

Metalloxidvaristoren in Gleichstromschaltervorrichtungen

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Maike Bröker, M.Sc.

Geboren am 4. April 1985 in Lindlar

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen
Zweitgutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing U. Schichler
Tag der Einreichung:	22. Februar 2019
Tag der mündlichen Prüfung:	18. Juli 2019

D17
Darmstadt 2019

Bröker, Maike: Metalloxidvaristoren in Gleichstromschaltervorrichtungen,
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-114012
<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/11401>

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/>

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Verzeichnis der Formelzeichen, Abkürzungen und chemischen Formeln	VII
Kurzfassung	XIII
Abstract	XV
1 Einleitung	1
2 MO-Varistoren zum Einsatz in Gleichstromschaltern – Grundlagen	5
2.1 Einsatz und betriebsbedingte Belastung von MO-Varistoren	5
2.1.1 Zusammensetzung, Herstellung und Ausführungsformen von MO- Varistoren	6
2.1.2 Prinzipielle Funktionsweise von MO-Varistoren	8
2.1.3 Degradation von MO-Varistoren	13
2.2 Grundsätzliche Funktionsweise eines Gleichstromschalterkonzepts	22
2.3 Belastung von MO-Varistoren in Gleichstromschaltern	25
3 Motivation und Ziele der Arbeit	33
4 Versuchstechnik	35
4.1 Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichspannungs-Ausschaltvorgangs	35
4.1.1 Prüfanforderungen	36
4.1.2 Funktionsweise des Versuchskreises	38
4.2 Anordnung zur Bestimmung der Gleichspannungscharakteristik	45
4.3 Doppelsexponentialstoßstromkreis zur Bestimmung der Impulscharakteristik	48
4.4 Abschätzung der Messunsicherheiten	49
4.5 Prüfkonzept	51
5 Belastung von MO-Varistoren mit Impuls- und Gleichspannungen	55
5.1 Verwendete MO-Varistoren und Versuchsübersicht	55
5.2 Vorgehensweise zur Darstellung und Auswertung der Ergebnisse	61
5.3 Darstellung der Untersuchungsergebnisse	71
5.3.1 Variation der Umgebungstemperatur	72

5.3.2	Variation der permanent anliegenden Gleichspannungsbelastung . . .	81
5.3.3	Variation der Energiedichte der Impulsbelastung	88
5.3.4	Einzeluntersuchungen	93
6	Fazit und Ausblick	101
Anhang		105
A	Zusatzinformationen zur Berechnung der Messunsicherheit	109
B	Zusatzinformationen zu den verwendeten Versuchseinrichtungen	113
B.1	Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichstromausschaltvorgangs .	113
B.2	Doppelexponentialstoßstromkreis	117
B.3	Anordnung zur Bestimmung der Gleichstromcharakteristik	121
Literaturverzeichnis		123
Eigene Publikationen		129
Betreute studentische Arbeiten		130
Lebenslauf		131
Erklärung laut Promotionsordnung § 9 PromO		133

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt. Zu dem Gelingen dieser Dissertation haben mehrere Menschen einen Beitrag geleistet, bei denen ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanken möchte.

Zuerst gilt mein ganz besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen, der mich ermutigte eine Promotion anzustreben und mir diese Möglichkeit innerhalb seines Fachgebietes anbot. Auch im Hinblick auf die Geburt meiner beiden Söhne konnte ich mich immer auf seine Unterstützung verlassen! Nur aufgrund des entgegengebrachten Vertrauens und der technischen Rahmenbedingungen war die Realisierung des Projektes in dieser Form möglich. Dafür bin ich besonders dankbar. Die fachlichen Diskussionen trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler von der Technischen Universität Graz möchte ich mich ganz herzlich für die Übernahme des Korreferats dieser Arbeit und die damit verbundenen, hilfreichen Verbesserungsvorschläge bedanken.

Außerdem gilt ein ganz großer Dank der ABB Schweiz AG zum Einen für die Finanzierung des Projektes, zum Anderen für das große Interesse daran, das mit ausführlichen und konstruktiven, fachlichen Diskussionen verbunden war. Zusätzlich stellte die ABB Schweiz AG dankenswerterweise einige der untersuchten MO-Varistoren bereit. Mein Dank gilt insbesondere Lise Donzel, Bernhard Doser, Nicola Gariboldi, Felix Greuter, Michael Hagemeister, Reto Kessler und Bernhard Richter.

Zudem danke ich der Firma Dehn und Söhne für die Bereitstellung von Varistoren, sowie für die Hilfe bei der Überarbeitung der Kontaktoberflächen einiger Varistoren.

Im Laufe meiner Zeit am Fachgebiet leisteten auch einige Studenten, in ihrer Funktion als Hilfwissenschaftler, oder auch durch das Anfertigen ihrer Abschlussarbeiten, einen nicht unbeträchtlichen Beitrag zu den Ergebnissen, die innerhalb dieser Arbeit vorgestellt werden. Auch ihnen möchte ich an dieser Stelle danken für die vielen Stunden im Labor und ihre Zuverlässigkeit.

Das Fachgebiet Hochspannungstechnik war ein sehr angenehmes Arbeitsumfeld, wo aus vielen Kollegen auch gute Freunde geworden sind. Ich möchte mich bei allen ehemaligen

und aktuellen Mitarbeitern des Fachgebietes für das Arbeitsklima aber natürlich auch für die fachliche und technische sowie administrative Unterstützung bedanken. Besonders bedanken möchte ich mich bei Maximilian Tuczek, der bereits meine Masterarbeit am Fachgebiet Hochspannungstechnik betreut hat, mir damit den Weg an das Fachgebiet ebnete und auch im Anschluss immer für fachliche Diskussionen offen war. Neben den Diskussionen mit vielen anderen Kollegen, möchte ich den Lesern des Manuskriptes, Moritz Gießel, Maximilian Secklehner, Peter Hock, Thomas Heinz, Michael Hagemeister und Lise Donzel, sowie Sabine Ufer, besonders danken, da sie trotz eigener Arbeitsbelastung nicht müde wurden, mir sehr hilfreiche Hinweise zu geben, die zur Verbesserung der Arbeit beitrugen.

Abschließend möchte ich mich mit einem ganz besonderen Dank für das Verständnis und die Unterstützung an meine Familie wenden. Insbesondere gilt dies für meinen Mann und meine beiden Söhne. Auch meine Mutter möchte ich an dieser Stelle hervorheben, da sie uns während der Anfertigung der schriftlichen Ausarbeitung eine sehr große Hilfe war.

Griesheim, im Juli 2019

Maike Bröker

Verzeichnis der Formelzeichen, Abkürzungen und chemischen Formeln

Verzeichnis der Formelzeichen

ΔT	K	Temperaturdifferenz
ϑ	°C	Temperatur
μT	1	Erwartungswert
σT	1	Standardabweichung
α	1	Nichtlinearitätsexponent
C	F	Kapazität
C_{IMP}	F	Kapazität eines Impulskondensators
d	m	Breite der Potentialbarriere
d_l	m	Breite der Potentialbarriere links der Korngrenze
d_r	m	Breite der Potentialbarriere rechts der Korngrenze
di/dt	A/s	elektrische Stromsteilheit
E	V/m	elektrische Feldstärke
E_b	eV	elektrische Feldstärke bei Referenzspannung des Varistors
E_C	eV	Energieniveau Leitungsband
E_F	eV	Fermi-Niveau
E_V	eV	Energieniveau Valenzband
E_r	V/mm	elektrische Feldstärke bei 10 kA Stromimpulsamplitude der Form 8/20 μ s
e_{x_i}	%	Abweichung eines einzelnen Messwertes von dem wahren Wert
e_y	%	Gesamtabweichung von dem wahren Wert
F	1	Funktion
h	m	Höhe des MO-Varistors
I	A	elektrische Stromstärke
I_0	A	elektrische Stromstärke während der Eingangsmessung
i	1	Laufindex
\hat{i}	A	Stromamplitude eines Stromimpulses

0 Symbolverzeichnis

I_H	A	Strom im Hauptstrompfad
I_k	A	Strom im Kommutierungspfad
I_{MOV}	A	Strom im Energie absorbierenden Pfad
J	A/m ²	Stromdichte
j	A/m ²	Stromdichte
k	1	Laufindex
L	H	Induktivität
L_C	H	Kommutierungsinduktivität
l	Å	Position gemessen von der Korngrenze
N	1	Grundgesamtheit der berücksichtigten Elemente
n_t	1	Anzahl der gebundenen Ladungsträger
n	1	Grundgesamtheit einer Menge
R	Ω	elektrischer Widerstand
R_1	Ω	Hochspannungsseitiger Widerstand eines Spannungsteilers
R_2	Ω	Niederspannungsseitiger Widerstand eines Spannungsteilers
R_{IMP}	Ω	Dämpfungswiderstand im Impulspfad
R_K	Ω	Kommutierungswiderstand
s^2	1	Stichprobenvarianz
T	s	Zeit
t	1	Vertrauensbereich
$T_{10\%}$	s	Zeit bis zum Erreichen von 10 % der Stromamplitude
$T_{90\%}$	s	Zeit bis zum Erreichen von 90 % der Stromamplitude
T_1	s	Stirnzeit eines Impulsstromes
T_2	s	Rückenhalfwertszeit eines Impulsstromes
U	V	Spannung
U_0	V	elektrische Spannung bei Eingangsmessung
U_{Cimp}	V	Ladespannung des Impulskondensators
U_{DC}	V	Gleichspannung
U_{imp}	V	Impulsspannung
U_{Mes}	V	Spannung am Niederspannungsteil des Spannungsteilers
U_{mess}	V	Spannung am Varistor zu Messzwecken
U_{mess}^*	1	Spannung am Varistor zu Messzwecken in Bezug auf die Referenzspannung
$U_{ref,0}$	V	Referenzspannung im unbelasteten Zustand
$U_{ref,bel}$	V	Referenzspannung im belasteten Zustand
U_{test}	V	Spannung am Varistor zu Testzwecken
W'	J/cm ³	Energiedichte der Stromimpulse im Dauerversuchskreis

U_{test}^*	1	Spannung am Varistor zu Testzwecken in Bezug auf die Referenzspannung
w	J/cm ²	Energiedichte
w_0	J/cm ²	Energiedichte bei Anlegen eines normgerechten Stromimpulses
\bar{x}		Schätzwert des Erwartungswertes
\bar{y}		Schätzwert vom Mittelwert
y		gesamtes Messergebnis
y_w		wahre Werte

Verzeichnis der Abkürzungen

A	Amperemeter
ABB	Asea Brown Boveri - Unternehmensname
AC	„Alternating Current“, Wechselstrom
ATH	“Auxiliary Thyristor“, Hilfsth Thyristor
DC	„Direct Current“, Gleichstrom
DS	„Disconnecter Switch“, Trennschalter
EEG	Erneuerbare Energien-Gesetz
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EU	Europäische Union
HSCB	“High Speed Circuit Breaker“, Hochgeschwindigkeitsgleichstromschalter
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	“Insulated-gate bipolar transistor“, Leistungselektronisches Element
IGCT	“Integrated gate-commutated thyristor“, Leistungselektronisches Element
LD	“Long Duration“, (Current Impulse, Rechteckimpulsstrom)
MBB	“Main Bypass Breaker“, Wechselstromschalter
MOV	Metalloxid-Varistor
MO-Varistor	Metalloxid-Varistor
MTHB	“Main Thyristor Back“, Hauptthyristor
MTHF	“Main Thyristor Forward“, Hauptthyristor
n.b.	nicht benannt
NR	“Non-uniform Resistance“, variabler Widerstand
O - C - O	Open - Close - Open (Kurzunterbrechungszyklus eines Leistungsschalters)
$S_{aux1-12}$	Hilfsschalter
S_H	Leistungselektronischer Schalter im Hauptstrompfad
S_k	Leistungselektronischer Schalter im Kommutierungspfad
S_m	Mechanischer Schalter im Hauptstrompfad
SR	“Silicon Rectifier“, Gleichrichterdiode
Sh1-Sh3	Stromshunt 1 bis 3
RT	“Radio Transformer“, Transformator
VD	„Voltage Divider“, Spannungsteiler

Verzeichnis der chemische Formeln

Ag	Silber
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
B	Bor
Bi ₂ O ₃	Bismuthoxid
CaO	Calciumoxid
CoO	Kobalddioxid
Fe ₂ O ₃	Eisenoxid
MgO	Magnesiumoxid
MnO	Manganoxid
O	Sauerstoff
Sb	Antimon
Sb ₂ O ₃	Antimonoxid
SiC	Siliziumcarbid
ZnO	Zinkoxid

Kurzfassung

Um den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen zu reduzieren, findet in der Europäischen Union (EU) und insbesondere auch in Deutschland ein intensiver Ausbau der Erneuerbaren Energien statt. Das stellt die derzeitigen Energieverteilungssysteme vor große Herausforderungen. Neben einer effizienten Möglichkeit der Speicherung von ungenutzter Energie liegen oft große Distanzen zwischen dem Ort der Energieerzeugung und den Verbrauchern. Für den Energietransport ist ein Gleichstromnetz besser geeignet als das bestehende Wechselstromnetz. Für den sicheren Betrieb eines vermaschten Gleichstromnetzes sind Gleichstromschalter notwendig. Verschiedene Konzepte sind derzeit in der Entwicklungs- und Erprobungsphase. Die Herausforderung besteht darin, dass es keinen natürlichen Stromnulldurchgang gibt, der im Fall eines Wechselstromschalters zum Lichtbogenlöschen dient. Unabhängig von dem betrachteten Gleichstromschalterkonzept ist es notwendig, ein Element in den Schalter zu integrieren, welches die einzelnen Elemente des Schalters vor Überspannungen schützt und die in den Netzinduktivitäten gespeicherte Energie aufnimmt. Eine Möglichkeit, die Energie abzuführen, ist ein Metalloxid-Varistor (MO-Varistor) in Form eines Überspannungsableiters, wie er in Wechselstromnetzen zum Schutz von Betriebsmitteln vor Überspannungen eingesetzt wird. Da ein MO-Varistor in einem Gleichstromschalter anderen Belastungen ausgesetzt ist als während des Betriebs in einem Wechselstromnetz, wird in dieser Arbeit eine Untersuchung bezüglich der Tauglichkeit bereits kommerziell erhältlicher MO-Varistoren innerhalb dieses neuen Einsatzgebietes durchgeführt. Die vorliegende Arbeit stellt einen zu Prüfzwecken eigens konzipierten Versuchskreis sowie ein Verfahren für die systematische Untersuchung kommerziell erhältlicher MO-Varistoren hinsichtlich der Veränderung ihres elektrischen Verhaltens aufgrund der neuartigen Belastungen vor. Die Untersuchung soll zeigen, ob die MO-Varistoren den verursachten Belastungen standhalten. Es wurden MO-Varistoren verschiedener Hersteller unter Variation mehrerer Parameter in Dauerversuchen belastet. Die erzielten Ergebnisse finden sich in einer Gegenüberstellung und Diskussion wieder. Sie belegen, dass sich MO-Varistoren aus konventionellem Material, wenn sie gleichstromstabil sind, für den Einsatz in einem Gleichstromschalter eignen. Ziel war es zudem, Parameter heraus zu arbeiten, die das elektrische Verhalten beeinflussen, und Erfahrungen zu sammeln, die bei der Erstellung von notwendigen Teststandards behilflich sein können. Sie werden abschließend diskutiert.

Abstract

To reduce the emission of climate-damaging gases, several measures have been initiated in the European Union (EU) and, in particular, in Germany to expand the utilization of renewable energy generating devices. Hence, less energy generated by conventional fossil-fueled power plants and more by means such as wind and solar farms is now provided to the grid. This poses significant challenges for today's energy transmission lines. In addition to the question of efficient energy storage, long distances must be overcome between energy production facilities and consumers. In contrast to alternating current lines, direct current lines are able to transport energy over large distances with fewer losses. The challenge in using direct current transmission grids is switching them on and off in a controlled manner. Various concepts for direct current breakers exist but are still undergoing testing. The challenge lies in the fact that there is no natural zero-crossing of the current in a direct current system. Regardless of which concept is used, it would require a device, which protects the electronic breakers against surges during the switching process. One possible solution is the use of a metal-oxide varistor (MO varistor) similar to its utilization in alternating grids to protect equipment against overvoltages. Because an MO varistor is stressed with different loads in a direct current breaker than during operation in an alternating system, this thesis aims to investigate the suitability of commercially available material on hand today. The thesis describes a test setup and procedure for investigating currently available MO varistors in relation to the degree of degradation in their electrical behavior. These tests are intended to reveal whether a given material would highly degrade or even fail. After having defined testing requirements, a concept for the electrical test setup was worked out and realized. Both of these steps are discussed in detail within the scope of this thesis. Using the test setup described, MO varistors from several different manufacturers were tested with varying parameters. The results are evaluated and interpreted herein. The aim is to identify which parameters influence electrical behavior and to provide insight which might be helpful for standardization. The results obtained from this investigation verify that conventionally available MO varistors can be used to protect direct current breakers if they are direct current stable.

1 Einleitung

Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels und der hiermit verbundenen Folgen einigte sich 1997 im Rahmen des Kyoto-Protokolls eine Mehrheit der weltweiten Industrienationen auf eine massive Reduzierung der Schadstoffausstöße [UN1998]. Im Bereich der Energieerzeugung ist dies vor allem durch den umfangreichen Ausbau der klimaneutralen, erneuerbaren Energien erreichbar. In der EU und insbesondere auch in Deutschland wurden die Vereinbarungen des Kyoto-Protokolls von der Politik in Form des Erneuerbaren Energien Gesetzes ([EEG2017] neuste Fassung) genutzt, um Maßnahmen der Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Energien zu initiieren. Das stellt die vorhandenen Energieübertragungs- und verteilungssysteme vor große Herausforderungen. Unweigerlich führt eine Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien in der elektrischen Energieversorgung dazu, dass neben einer effizienten Möglichkeit der Speicherung von ungenutzter Energie große Distanzen zwischen dem Ort der Energieerzeugung und den Verbrauchern überwunden werden müssen, um Erzeugung und Verbrauch zu synchronisieren. Die örtliche Trennung von Erzeugung und Verbrauch entsteht, da ein Wechsel von einzelnen zentral gelegenen und mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken hin zu dezentral gelegenen, z. B. auf Wind- und Sonnenenergie basierenden Kraftwerken stattfindet. Das derzeit bestehende, mit Wechselstrom betriebene Übertragungs- und Verteilnetz wird dieser Herausforderung nicht wirtschaftlich begegnen können, da hier die induktiven und die kapazitiven Verluste (die Blindleistung) ab einer Transportstrecke von einigen 100 km zu groß werden [MYU2016]. Eine mögliche Lösung dieser Herausforderung ist die Umstellung des Transport- und Verteilnetzes auf Gleichstrom, da hier keine Blindleistungsverluste auftreten und die Belastbarkeit um ein Vielfaches höher liegt. Um ein vermaschtes Gleichstromnetz sicher betreiben zu können, muss es möglich sein, innerhalb kurzer Zeit kontrolliert einzelne Leitungen bzw. ganze Bereiche zu- und abzuschalten. Die aus der Wechselstromtechnik bekannten Schalterkonzepte kommen hierfür nicht in Frage, da bei diesen ein erfolgreicher Schaltvorgang auf dem Vorhandensein eines Stromnulldurchgangs basiert. Verschiedene Hersteller haben derzeit Gleichstromschalterkonzepte im Bereich der Mittel- und Hochspannungstechnik veröffentlicht. Die vorhandenen Konzepte (eine Übersicht der grundsätzlichen Prinzipien findet sich in [Wal2013] oder auch [Hei2017]) befinden sich derzeit noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase. Sie bestehen meist aus einer Kombination eines mechanischen und eines elektronischen Schalters

1 Einleitung

oder einer Anordnung, die einen künstlichen Stromnulldurchgang erzwingt. Die Anordnungen haben das Vorhandensein eines Energie absorbierenden Elementes gemeinsam, welches die in den Netzinduktivitäten und der Systemquelle gespeicherte Energie im Anschluss an eine Schalthandlung aufnehmen muss. Eine gute Wahl ist an dieser Stelle der Einsatz von Metalloxid-Varistoren (MO-Varistor, MOV) in Form von Überspannungsableitern.

MO-Varistoren werden herkömmlich in Wechselstromnetzen als Schutz von Betriebsmitteln vor Überspannungen installiert, wie sie z. B. in Folge eines Blitzeinschlages oder einer Schalthandlung im Netz auftreten. Aufgrund ihrer Materialzusammensetzung zeichnen sich MO-Varistoren durch ihre stark nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik aus. Diese ermöglicht einen Parallelbetrieb zu einem zu schützenden Betriebsmittel, wobei nur minimale Verluste entstehen. Es fließt im Normalbetrieb ein Strom von wenigen Mikro-Ampere. Im Fall einer Überspannung besitzen sie nur noch einen sehr geringen Widerstand. Es entsteht ein Stromfluss im Kilo-Ampere-Bereich, und die vorhandene Ladung wird gegen Erde abgeführt, wodurch andere Betriebsmittel geschützt sind. Im Wechselstromnetz nehmen MO-Varistoren nur wenige Male innerhalb ihrer Lebensdauer Energie auf, und dies in großem zeitlichen Abstand. Dabei handelt es sich um Schalt- und Blitzüberspannungen. Bezüglich der auftretenden Belastungen im Wechsellspannungsnetz wurde das Material innerhalb der letzten 40 Jahre auf sein Verhalten hin untersucht und optimiert. Infolge dessen existieren umfangreiche Normen [IEC60099-4; IEC60099-5; IEC60099-9]. Zudem entstanden aus Forschungsarbeiten unter Beteiligung der Fachgebiete “Hochspannungstechnik“ und “Theorie Elektromagnetischer Felder“ der Technischen Universität Darmstadt die Cigré-Broschüren 544 [Cig2013] und 696 [Cig2017]. Die darin beschriebenen Ergebnisse werden durch die Ergebnisse dieser Arbeit erweitert.

Werden MO-Varistoren in einem Gleichstromschalter eingesetzt, ergeben sich von der Belastung in einem Wechselstromnetz abweichende Anforderungen. Jeder Ausschaltvorgang führt zu einer Beanspruchung des MO-Varistors. Dies hat zur Konsequenz, dass bei einer mitunter geforderten Mindestlebensdauer von 10 000 Schalthandlungen [IEC62771-100] entsprechend oft die Energie aufgenommen werden muss, ohne dass sich das elektrische Verhalten des Varistors nachteilig verändern darf¹. Zudem können die Belastungen innerhalb von Sekunden und schneller aufeinander folgen (z. B. im Falle einer Kurzunterbrechung). Der entstehende Energieeintrag kann sich unter Umständen aus zwei Komponenten zusammensetzen. Abgesehen von einer Impulsbelastung während des Ausschaltvorgangs selbst kann zusätzlich eine Gleichspannung anliegen, wenn der Schalter den Strom unterbrochen und der vorgelagerte Trennschalter den Gleichstromleistungsschalter noch nicht von

¹ Für Wechselstromanwendungen darf sich die Spannung am MO-Varistor bei gleichbleibendem Strom nur in vorgegebenen Grenzen verändern [IEC60099-4].

dem speisenden Netz getrennt hat. Ausnahmen existieren und sehen z. T. einen Betrieb ohne vorgelagerten Trennschalter vor. Zudem existieren Schalterkonzepte, bei denen ein absorbierendes Element permanent mit Gleichspannung belastet wird. Veröffentlichte, systematische Untersuchungen hinsichtlich der Eignung von derzeit kommerziell erhältlichen MO-Varistoren für die Aufnahme dieser auftretenden Energieeinträge gibt es bislang noch nicht.

In der vorliegenden Arbeit werden die Durchführung sowie die Ergebnisse einer systematischen Untersuchung von derzeit kommerziell erhältlichen MO-Varistor-Materialien verschiedener Hersteller für den Einsatz in Gleichstromleistungsschaltern vorgestellt. Das Ziel der Untersuchung war eine Beurteilung der Materialien auf ihre funktionale Einsatzfähigkeit innerhalb eines beschriebenen Schaltszenarios. Anhand der im Worst-Case zu erwartenden elektrischen Belastungen ergeben sich die möglichen Prüfparameter, deren Einfluss durch systematische Variation herausgearbeitet und für Vorschläge der Art und des Umfangs eines potentiellen Prüfzenarios genutzt werden. Für die Durchführung einer systematischen Untersuchung mit bis zu 35 000 Impulsstrombelastungen pro MO-Varistor ist ein robuster Versuchsaufbau unerlässlich. Dieser darf zudem die Prüfparameter während der Versuchsreihen nicht verändern. Daher liegt ein weiterer Fokus auf der detaillierten Erläuterung des elektrischen Versuchsaufbaus, der der Belastung der MO-Varistoren im Rahmen dieser Untersuchung dient und im Zuge der Arbeit aufgebaut und optimiert wurde.

Struktur der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit erfolgt eine Darstellung der Grundlagen zum Thema MO-Varistoren. Hierbei kann aufgrund des Umfangs bereits aus der Forschung vorhandener Erkenntnisse kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Dennoch sind mit einer Übersicht zu den Themen *Zusammensetzung, Herstellung und Bauformen* und *prinzipielle Funktionsweise* sowie der *Degradationvorgänge* alle für das Verständnis der Arbeit notwendigen Aspekte berücksichtigt. Ähnlich verhält es sich für die Technologie des Gleichstromschalters. Hierbei beschränken sich die Grundlagen auf ein hybrides Schalterkonzept und die damit verbundenen Belastungen für einen MO-Varistor. Eine Untersuchung aus dem Jahr 1983 [JN1983], die sich mit dem gleichen Thema, basierend auf damaligen Schalterkonzepten und Varistormaterialien beschäftigt, bildet den Abschluss der Grundlagen.

Im Anschluss erfolgt eine detaillierte Erläuterung der eingesetzten Versuchstechnik. Insbesondere der Aufbau, der der Dauerbelastung der MO-Varistoren und damit der Nachbildung der Belastungen während eines Schaltszenarios dient, findet ausführliche Beachtung, da ein solcher Aufbau bislang in der Literatur nicht beschrieben wurde. Neben einer Herleitung der *Prüfanforderungen* an den Versuchsaufbau selbst sind auch Erläuterungen zu seiner

1 Einleitung

Funktionsweise, der *Steuerung* und dem *Sicherheitskonzept* enthalten. Zusätzlich werden alle weiteren zum Einsatz kommenden Versuchsanordnungen kurz erklärt. Dieses Kapitel endet mit einer Bestimmung der *Messunsicherheit* der für die Ergebnisse relevanten Messeinrichtungen und einer Vorstellung des *Prüfkonzeptes*.

Nachfolgend beginnt eine zusammenfassende Darstellung der innerhalb dieser Untersuchung erzielten Resultate. Zu diesem Zweck erfolgt zunächst eine detaillierte Erläuterung zu den eingesetzten MO-Varistoren, den erhobenen Daten sowie eine Erklärung der Darstellungsformen. Letzteres ist insofern notwendig, als dass es nicht möglich ist, die Ergebnisse innerhalb der vorliegenden Arbeit vollumfänglich darzustellen. Im Rahmen dieser Übersicht steht die Variation dreier Prüfparameter im Vordergrund. Es werden insbesondere der Einfluss der *Umgebungstemperatur*, der *permanenten Gleichspannungsbelastung* sowie der *Impulsstromenergiedichte* genauer betrachtet. Ergänzend zeigen zwei *Einzeluntersuchungen* auf, welchen Einfluss ein Wechsel der Flussrichtung des Belastungsstromes und die Belastung durch die ersten in die Varistoren eingetragenen Impulsbelastungen auf ihr Degradationsverhalten hat.

Die vorliegende Arbeit endet mit einem *Fazit*, welches eine Beurteilung der Einsatzfähigkeit des derzeit kommerziell erhältlichen MO-Varistormaterials enthält. Es wird durch einen *Ausblick* ergänzt, der Empfehlungen zum weiteren Vorgehen sowie zur weiteren Spezifizierung des Einsatzes von MO-Varistoren in Gleichstromleistungsschaltern beinhaltet.

2 MO-Varistoren zum Einsatz in Gleichstromschaltern – Grundlagen

Zunächst gibt dieses Kapitel einen groben Einblick zum Thema MO-Varistoren. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der Darstellung zu der Herstellung, der Wirkungsweise und der Belastung, sowie deren Einfluss auf das elektrische Verhalten von MO-Varistoren. Um nicht den Überblick über die innerhalb dieser Arbeit relevanten Grundlagen zu verlieren, beschränken sich diese Abschnitte auf die für das Verständnis notwendigen Aspekte. Im Anschluss daran erfolgt eine kurze Einführung zum Thema Gleichstromleistungsschalter, wobei u. a. anhand eines ausgewählten Schalterkonzeptes die während des Schaltvorgangs auftretenden Spannungs- und Stromverläufe betrachtet werden. Hieraus ergibt sich eine Gegenüberstellung der Belastungen von MO-Varistoren bei konventionellem Einsatz und einem bislang nur wenig erprobten Einsatz innerhalb eines Gleichstromschalters. Das Kapitel endet mit der Vorstellung einer Untersuchung aus den 1980iger Jahren, die sich bereits mit den Auswirkungen des Einsatzes damals erhältlicher MO-Varistoren in einem Gleichstromschalterprototypen befasst hat.

2.1 Einsatz und betriebsbedingte Belastung von MO-Varistoren

Das klassische Einsatzgebiet von MO-Varistoren liegt im Schutz von Betriebsmitteln gegen Überspannungen. Durch ihre Zusammensetzung und den in *Kapitel 2.1.1* erläuterten Aufbau sind sie dazu in der Lage, die im Netz vorhandene, überschüssige und damit abzuführende Ladung bzw. Energie in Wärme umzusetzen und somit die nachgelagerten Betriebsmittel zu schützen. Untersuchungen der letzten Jahrzehnte [Eda1989, Cig2017] führten zu einer andauernden Weiterentwicklung und damit einer Optimierung des Herstellungsverfahrens und der Materialzusammensetzung, welche den vorhandenen Belastungen (im Rahmen der zulässigen Material- und damit Kennlinienveränderungen²) standhalten muss. Dennoch treten während ihres Betriebs belastungsabhängige Veränderungen innerhalb der Materialstruktur auf. Diese führen zu Änderungen des elektrischen Verhaltens, auch Degradation

² IEC-Norm [IEC60099-4] gibt hierfür die Untersuchungskriterien und Grenzwerte an.

genannt, und können sowohl durch die Wärmeentwicklung als auch durch den Stromfluss an sich entstehen. Dabei erzeugen unterschiedliche Stromformen verschieden ausgeprägte Veränderungen. Sie sind unter Umständen reversibel und lassen sich oft durch die stromlose Lagerung bei Umgebungstemperaturen oberhalb von 200 °C [Eda1989, Gup1990, GB1990] zurückbilden, können allerdings auch irreversibel sein.

2.1.1 Zusammensetzung, Herstellung und Ausführungsformen von MO-Varistoren

Der nachfolgende Abschnitt fasst den Stand des Wissen zum Thema MO-Varistoren zusammen und stützt sich dabei auf die Quellen [Eda1978, Gup1990, GB1990, Gre1995, Cla1999, Hin2011, ABB2011].

Elektrisch aktiv ist in einem Überspannungsableiter eine Reihenschaltung von MO-Varistoren. Sie werden von einem Gehäuse umgeben, welches entweder aus Porzellan oder aus Kunststoff bestehen kann. Es dient dem Schutz der Varistoren vor äußeren Einflüssen, wie beispielsweise Verschmutzung, und stabilisiert den Gesamtaufbau [Hin2011]). Die MO-Varistoren weisen ihre elektrischen Eigenschaften insbesondere aufgrund der Inhaltsstoffe und der aufwändigen Herstellung auf. Zu etwa 90 % der Gesamtmasse bestehen MO-Varistoren aus Zinkoxid (ZnO). Die restlichen ca. 10 % werden in ihrer genauen Zusammensetzung von den Herstellern geheim gehalten. Dennoch sind einige der mitunter bis zu 11 Additive [GB1990, Cig2013] und deren Auswirkungen auf die Materialeigenschaften aus verschiedenen Veröffentlichungen, wie [Eda1988, Eda1989, GB1990, Gup1990, Sch1994, Kle2004], bekannt. Hierzu zählen unter anderem MnO, CoO und Al₂O₃ zur Verbesserung der Nichtlinearität [Eda1988, SG1990], Sb, Ag und B zur Erhöhung der Stabilität oder auch Sb₂O₃, Al₂O₃ Fe₂O₃ CaO und MgO zur Hemmung des Kornwachstums [USP2012]. Die häufigst vertretenen Additive sind Bi₂O₃, CoO, MnO und Sb₂O₃. Die Inhaltsstoffe werden aus einer ursprünglichen Pulverform im Verlauf des Herstellungsprozesses zu einem festen zylindrischen Block. Dieser setzt sich aus Aneinanderreihungen von in der Herstellung gewachsenen “Körnern”³ zusammen, deren Grenzen wiederum ursächlich für den sogenannten Varistoreffekt sind.

Zu Beginn des Herstellungsprozesses werden die genannten Substanzen, die zum Teil nur mit Mengen im ppm-Bereich bemessen sind und zunächst in Pulverform vorliegen, möglichst homogen vermischt. Einzelne ZnO-Partikel besitzen eine Größe von 1 µm [Cig2013]. Eine

³ Ein Korn ist ein Bereich des Kristallgitters, welches die gleiche Richtung aufweist. Es ist durch die sog. Korngrenze von Bereichen anderer Ausrichtung getrennt [KS2012].

2.1 Einsatz und betriebsbedingte Belastung von MO-Varistoren

homogene Pulverdurchmischung ist essentiell für das Erreichen der wünschgemäßen elektrischen Eigenschaften des MO-Varistors. Um bestmögliche Homogenität der Pulverrezeptur zu erzielen, findet die Durchmischung der Bestandteile in Wasser und unter Beigabe von Binde- und Lösungsmitteln statt.

Ein Sprühtrockner entzieht dem so entstandenen Schlicker nachfolgend die Feuchtigkeit. Das resultierende Granulat wird in unterschiedlich hohe Scheibenformen gepresst, wobei es wiederum von größter Wichtigkeit für die Qualität ist, dass die entstandenen Blöcke eine homogene Dichte aufweisen. Im Anschluss durchlaufen die Varistorblöcke einen Ofen bei exakt festgelegten Temperaturabfolgen von bis zu 1 100 °C, teilweise auch bis 1 350 °C [Mat1971, GB1990, Cig2013]. Diesen Vorgang nennt man Sintern. Es führt zu einer weiteren Verdichtung. Im Zuge des Sinter-Prozesses wachsen die ZnO-Partikel und die Additive zusammen, und die sogenannten Korngrenzen, bilden sich aus. Sowohl die exakten Pulverzusammensetzungen als auch die Temperaturabfolgen während des Sintervorgangs unterliegen strengster Geheimhaltung durch die Hersteller, da sie durch die Beeinflussung des Kornwachstums [KS2012] als Stellschrauben der elektrischen Eigenschaften dienen [GST2015]. Um den MO-Varistor vor Umwelteinflüssen zu schützen, umgibt ihn ein Mantel aus einer Glaskeramik, die wiederum in Farbe und Ausführung von Hersteller zu Hersteller variiert. Die Kontaktflächen – Ober- und Unterseite – des MO-Varistorblocks, im Folgenden ebenfalls als MO-Varistor bezeichnet, erhalten eine leitfähige Beschichtung, wie z. B. Aluminium. Beispiele für kommerziell gefertigte MO-Varistoren sind in *Abbildung 2.1* zu sehen. Es existieren unterschiedliche Ausführungen. Dies ist in den verschiedenen Anforderungen je nach Einsatzgebiet begründet. So ist es durch eine Steigerung der Höhe des MO-Varistors möglich, diesen bei höheren Spannungen zu betreiben. Da produktionsbedingt der Höhe der Varistoren eine Grenze von etwa 100 mm (heute typischer Maximalwert: 45 mm) auferlegt ist, werden einzelne MO-Varistoren für den Betrieb im Bereich der Hoch- und Mittelspannungstechnik in Reihe betrieben und zu diesem Zweck aufeinander gestapelt. Dieser MO-Varistor-Stapel befindet sich als Aktivteil in einem Überspannungsableiter. Der Durchmesser eines MO-Varistors bestimmt seine Stromtrag- bzw. Energieaufnahmefähigkeit und somit die in Wärme umwandelbare Energie, die nicht zu seiner Zerstörung führt. Sind große Energieeinträge zu erwarten (z. B. beim Schutz von Serienkompensationsanlagen) werden mehrere Überspannungsableiter parallel betrieben⁴. Der Durchmesser beeinflusst zudem die Restspannung bei einem eingepprägten Stoßstrom.

⁴ Ein Parallelbetrieb von Überspannungsableitern ist nicht problemlos möglich, da sie untereinander eine maximale Kennlinienabweichung von $\pm 5\%$ nicht überschreiten dürfen [IEC60143-2, TBH2015].



Abbildung 2.1: MO-Varistoren für Hochspannungsanwendungen in unterschiedlichen Ausführungen. Höhe und Durchmesser variieren. [Hin2011]

2.1.2 Prinzipielle Funktionsweise von MO-Varistoren

Die Materialzusammensetzung und die aus der Herstellung resultierende Struktur führen dazu, dass MO-Varistoren für den Schutz von Betriebsmitteln gegen Überspannungen geeignet sind. Sie zeichnen sich durch eine stark nichtlineare E - J -Charakteristik aus, wie sie in *Abbildung 2.2* zu sehen ist, und deren Auswirkung bereits zu Beginn angedeutet wurde. Hierbei handelt es sich um einen beispielhaften Verlauf, der nur die resistiven Anteile der Stromdichte zeigt⁵. Aufgetragen ist, linear skaliert, der auf den Wert bei 10 kA normierte Scheitelwert der Feldstärke über dem logarithmisch skalierten Stromdichtescheitelwert. Der Verlauf der Kennlinie lässt sich im Allgemeinen durch die nachstehende *Gleichung 2.1* beschreiben.

$$J = k \cdot E^\alpha \quad (2.1)$$

Bei α handelt es sich um einen Nichtlinearitätsexponenten und bei k um einen Wert, der mit dem elektrischen Widerstand des Varistors verknüpft ist. Im Bereich geringer Stromstärke, auch Leckstrombereich genannt, verhält sich der MO-Varistor nahezu linear. Der Exponent α aus *Gleichung 2.1* nimmt Werte unter fünf an [LP1976]. Dies führt dazu, dass bei anliegender Betriebsspannung⁶ des Überspannungsableiters nur ein sehr geringer Strom (der sogenannte Leckstrom mit einigen 10 Mikro-Ampere bis 200 Mikro-Ampere) fließt und somit nur geringe Verluste innerhalb des Normalbetriebs entstehen. In *Abbildung 2.2* ist zusätzlich zu einer Messung bei Wechselspannung (schwarz durchgängig) auch das Ergebnis einer Gleichspannungsmessung (blau) zu sehen. Die Stromstärken liegen hier zunächst bei gleicher Feldstärke, wie im Falle einer Wechselspannung, erheblich niedriger, was un-

⁵ Sofern notwendig, findet gegen andere Stromkomponenten eine messtechnische Kompensation statt, [Rei2008].

⁶ Leiter-Erde-Spannung

ter anderem an der Messmethodik liegt. Diese wird in *Kapitel 4.2* detailliert vorgestellt. Zusätzlich erfolgt hier auch eine Erläuterung zu dem Zustandekommen des erwähnten Unterschiedes im Strom je nach Spannungsart.

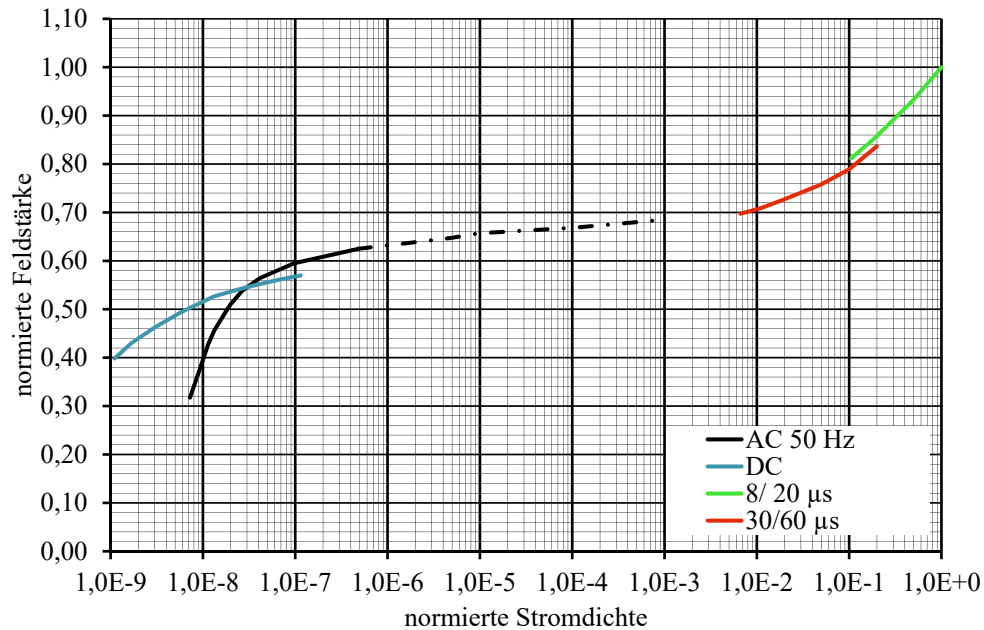


Abbildung 2.2: Prinzipieller Verlauf der E - J -Charakteristik. Dargestellt sind normierte Scheitelwerte aus AC-Messungen (schwarz), 8/20-µs-Impulsstrom-Messungen (rot), 30/60-µs-Impulsstrom-Messungen (grün) sowie Werte aus DC-Messungen (blau), wobei auf der y-Achse die Feldstärke auf die Feldstärke bei 10 kA und für die x-Achse die Stromdichte auf diejenige bei 10 kA normiert ist. Für den Verlauf der AC-Kennlinie wurden Stromscheitelwerte zwischen 7 mA und 200 A interpoliert, vgl. auch [ABB2011, Hin2011].

Mit steigender Feldstärke wird die Charakteristik zunehmend nichtlinear. Im Übergangsbereich von dem Leckstrom- zu dem sogenannten Vordurchbruchbereich liegt die Referenzspannung des Überspannungsableiters. Dies ist ein vom Hersteller, über den fließenden Strom (von 0,5 mA bis 10 mA, auch Referenzstrom genannt), definierter Wert, der zu Prüfzwecken dient. Die Höhe des Referenzstromes wird so gewählt, dass der Stromscheitelwert deutlich resistiv ist und somit Einflüsse durch Streukapazitäten vernachlässigt werden können. Im Vordurchbruchbereich führen geringe Feldstärkeanstiege zu einer großen Stromerhöhung. Für α werden in der Literatur zweistellige (30 bis 80 [Cla1999]), zum Teil

sogar dreistellige Werte (bis 200 [GB1990]), angegeben. Die Ausprägung der Nichtlinearität und damit die Höhe von α ist unmittelbar von der Materialzusammensetzung und dem Produktionsprozess abhängig und kann daher stark variieren [GST2015]. In diesem Feldstärkebereich ist die Darstellung der Charakteristik häufig approximiert (hier schwarz gestrichelt), da DC- und AC-Messungen bei den in diesem Bereich fließenden Strömen unmittelbar zu einer Zerstörung des MO-Varistors führen. Messungen mit Impulsströmen sind meist aufgrund der Beschaffenheit der Prüfkreise in diesem Bereich nicht oder nur unzureichend genau möglich. Im Betrieb erreicht ein Überspannungsableiter einen Arbeitspunkt in diesem Strombereich nur im Falle von zeitweiligen betriebsfrequenten Überspannungen.

Bei einer Beanspruchung des Überspannungsableiters durch einen Blitz- oder Schaltstoßstrom fließen unter Umständen Ströme bis zu 40 kA⁷. In diesem Strombereich, auch Durchbruchbereich genannt, liegt erneut ein nahezu lineares Verhalten vor, und α nimmt Werte von kleiner fünf an. Die Nachbildung der Belastung zur Bestimmung der Charakteristik erfolgt für diesen Strombereich überwiegend mit Exponential-Stoßströmen der Form $8/20 \mu\text{s}$ ⁸ und $30/60 \mu\text{s}$ ⁹. Mit der beschriebenen Charakteristik benötigt ein Überspannungsableiter für einen sicheren Betrieb keine in Reihe geschaltete Funkenstrecke, sondern geht stattdessen bei steigender Feldstärke kontinuierlich in den jeweiligen höheren Strombereich über. Dabei erwärmt er sich bei Belastungen mit betriebsfrequenten Überspannungen oder auch Blitz- und Schaltstoßströmen zunehmend und führt bis zu seiner Abkühlung auf die ursprüngliche Temperatur zunächst auch im Dauerbetrieb einen erhöhten Strom, da die Charakteristik in diesem Spannungsbereich stark temperaturabhängig ist [Eda1978b, BCM1996]. Kann die Wärme nicht in ausreichendem Umfang abtransportiert werden (durch Strahlung, Wärmeleitung oder Konvektion), kommt es ggf. zu einer weiterführenden Aufheizung. Dies kann im weiteren Verlauf zu thermischer Instabilität des Überspannungsableiters und letztendlich zu seiner Zerstörung führen.

Innerhalb des Materials spielen sich mit steigender Feldstärke verschiedene Leitungsmechanismen ab [GB1990, Gup1990, Cla1999, Cig2013]. Sie sind auch zum heutigen Zeitpunkt noch nicht vollständig verstanden. Der nachfolgende Abschnitt dient nicht dazu, einen umfassenden Überblick zu den verschiedenen Theorien zu geben, sondern viel mehr ein elementares Verständnis der Vorgänge im Material zu vermitteln. Die an dieser Stelle vorgestellten Abläufe sind für die Interpretation der Ergebnisse dieser Arbeit notwendig. Eine stark vereinfachte Darstellung der Materialstruktur eines ZnO-basierten Varistors ist

⁷ Die Darstellung in *Abbildung 2.2* endet mit den in dieser Arbeit untersuchten Werten bei 10 kA.

⁸ Die Zeiten beschreiben die Stromform der Impulse, dabei steht die vordere Zahl für die Anstiegs- und die hintere Zahl für die Rückenhalfwertszeit.

⁹ Auch kürzere Impulsformen wie $4/10 \mu\text{s}$ und $1/20 \mu\text{s}$ sind für die Bestimmung üblich, an dieser Stelle aber nicht weiter betrachtet, da sie für das Verständnis der Arbeit keinen Mehrwert darstellen.

in der nachfolgenden *Abbildung 2.3* zu sehen. Der linke Bereich der *Abbildung 2.3 a)* stellt eine Skizze dar, die die Materialstruktur des MO-Varistors in starker Vergrößerung zeigt. Zu sehen sind vier ZnO-Körner (anthrazit) mit einer sog. Spinell-Phase (blau) und der intergranularen Schicht (weiß belassen). Die Größe der ZnO-Körner ist, wie bereits erwähnt, abhängig von der Temperaturabfolge während des Sinterprozesses, sowie den Additiven des Pulvergemisches. Die Spinell-Phasen bestehen vorwiegend aus Zink, Antimon und Sauerstoff [LP1975, RBD2012]. Sie haben nur einen indirekten Einfluss auf die Leitungsmechanismen, indem sie während der Kristallisierung für eine Hemmung des ZnO-Kornwachstums und eine homogenere Verteilung der Korngrößen sorgen [Cig2013]. Zwischen den ZnO-Körnern lagern sich intergranulare Schichten an. Sie bestehen hauptsächlich aus Bi_2O_3 [GB1990, Cig2013], welches für die Ausprägung des Varistoreffektes essentiell ist. Es ist möglich, Bismuth durch equivalenten Dotierstoffe wie Praseodym [Gup1990] zu ersetzen.

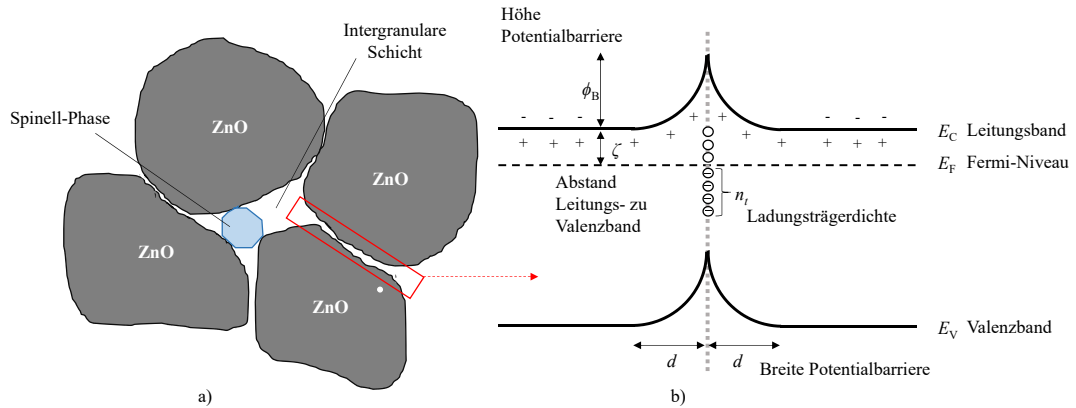


Abbildung 2.3: a) Vereinfachte Darstellung der Grundstruktur eines auf ZnO basierenden Varistors, frei nach [DGC2011]. Zu sehen sind die ZnO-Körner, sowie eine sog. Spinell-Phase und die intergranularen Schichten. b) Bänderdiagramm einer Korngrenze nach Ladungsausgleich (nach [Cla1999]).

Abbildung 2.3 b) zeigt das Bändermodell einer Korngrenzschicht, wie sie links (rot) markiert ist. An den Berührungspunkten (ZnO-Grenzschicht-ZnO) ergeben sich zunächst unterschiedliche Fermi-niveaus¹⁰ (hier nicht dargestellt). Das Bismuth in den Grenzschichten führt dazu, dass Ladungsträger (hier Elektronen) aus dem Korninneren in die Grenzschicht wandern und dort in den vorhandenen Defektzuständen gebunden werden, um so für

¹⁰ Die Energie, die bei dem absoluten Temperaturnullpunkt die Grenze zwischen besetzten und nicht besetzten Zuständen darstellt, wird als die sog. Fermienergie bezeichnet. Das Fermi-niveau befindet sich zwischen Leitungs- und Valenzbandkante und bestimmt mit seiner Lage, inwieweit es sich um einen Leiter, Halbleiter oder Isolator handelt [Gau2001].

einen Ladungsausgleich und somit einer Vergleichmäßigung des Fermi-niveaus zu sorgen. Insbesondere der Sauerstoff innerhalb der intergranularen Schicht erzeugt Defektzustände im Korngrenzbereich, die die Potentialbarriere erhöhen, [SG1990]. Der Zustand des Ladungsausgleiches ist in *Abbildung 2.3* zu sehen. Aus der beschriebenen Elektronenbewegung resultiert eine negative Ladungszone in der Grenzschicht, während zu beiden Seiten der Grenzschicht eine positive Raumladungszone entsteht. Die resultierende Potentialbarriere wird aufgrund ihrer Wirkungsweise auch doppelte Schottky-Barriere genannt und verhindert einen kontinuierlichen Stromfluss.

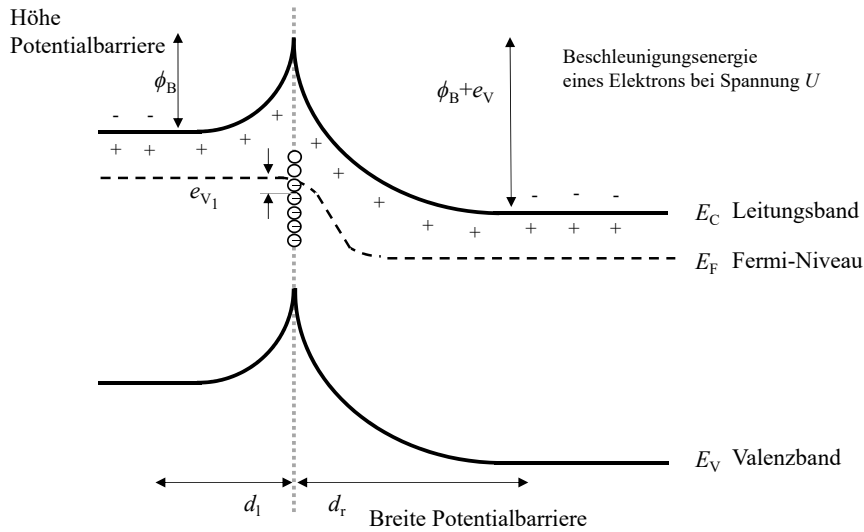


Abbildung 2.4: Bänderdiagramm einer Korngrenze nach Anlegen eines externen elektrischen Feldes, hier die Spannung U (nach [Cla1999])

Durch das Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes verschieben sich die Energieniveaus des Bändermodells, wie es in *Abbildung 2.4* dargestellt wird. In diesem Zustand ist es Elektronen auf höheren Energiezuständen möglich, die Potentialbarriere zu überwinden. Anfänglich werden sie jedoch von noch vorhandenen unbesetzten Defektzuständen in der Korngrenzschicht gebunden. Dies führt zu einer Stabilisierung der Potentialbarriere und somit zu einem noch geringen Stromfluss, dem Leckstrom. Der beschriebene Vorgang wird Pinning genannt. Anhand der beschriebenen Vorgänge erklärt sich auch die starke Temperaturabhängigkeit des Leckstrombereichs. Höhere Umgebungstemperaturen führen dazu, dass sich eine größere Anzahl an Elektronen auf einem höheren Energieniveau befindet, welches es ihnen ermöglicht, ebenfalls die Potentialbarriere zu überwinden. Auf diese Weise führt eine höhere Temperatur zu einem erhöhten Leckstrom, wie es auch in [Eda1984, Eda1989] zu sehen ist. Steigt die angelegte Spannung U in *Abbildung 2.4* auf

Werte der Durchbruchspannung¹¹ an, kommt es zu zusätzlichen Leitungsmechanismen. Erreicht die Spannung die Durchbruchspannung der Korngrenzen, werden die Elektronen so stark beschleunigt, dass ihre kinetische Energie ausreicht, um weitere Ladungsträger durch Stoßionisation zu erzeugen, sog. "Heiße Elektronen". Zudem entstehen hierbei Löcher, die in Richtung der Korngrenze diffundieren und dort gebundene negative Ladung neutralisieren. Dies führt zu einer Herabsetzung der Potentialbarriere, wodurch Ladungsträger immer niedrigerer Energieniveaus die Potentialbarriere überwinden können. Dieser sich selbst verstärkende Effekt führt letztlich zu einem vollständigen Abbau der Potentialbarriere und hierdurch zu einem leitfähigen MO-Varistor. Es fließt nun ein sehr hoher Strom (im Kilo-Ampere-Bereich). In diesem Spannungsbereich dominiert der Mechanismus der "Heißen Elektronen" den Stromfluss, welcher von der anliegenden Spannung und nur unwesentlich von der Temperatur abhängig ist. Sinkt die angelegte Spannung ab, bevor es zu einer Zerstörung des Varistors kommt, stellen sich die ursprünglichen Strukturen im Material weitestgehend wieder ein. Hierdurch auftretende, kleine Veränderungen im Material (Degradation), die die elektrischen Eigenschaften nachhaltig beeinflussen, werden für verschiedene Belastungsarten im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

2.1.3 Degradation von MO-Varistoren

Die elektrische Belastung von MO-Varistoren führt grundsätzlich zu Veränderungen in der Materialstruktur und damit des elektrischen Verhaltens (dem Verlauf der E - J -Charakteristik). Hierbei führen verschiedene Belastungsarten zu unterschiedlich ausgeprägten Degradationen. Die Veränderungen im Material werden in der Literatur meist auf eine Reduzierung der Sauerstoffionen in der Korngrenzregion zurückgeführt. Wie in *Kapitel 2.1* beschrieben, bestehen die intergranularen Schichten zwischen den ZnO-Körnern (*Abbildung 2.3*) unter anderem aus Bi_2O_3 , welches ursächlich für den Varistoreffekt ist. Untersuchungen von [BGR1989, GB1990] zeigen eine starke Korrelation zwischen einem Anstieg des Leckstromes und einer Reduzierung der Sauerstoffkonzentration im Korngrenzbereich (*Abbildung 2.5*). Links in der Grafik zeigt sich eine Veränderung der Charakteristik von einem unbelasteten Varistor (1) zu einem im Anschluss an die Produktion erneut in Luft erhitzten (2) über einen ebenfalls nachträglich erhitzten (3), in diesem Fall in Vakuum, bis hin zu einem elektrisch beanspruchten MO-Varistor (4). Die unterschiedlichen Belastungen führen dazu, dass der Leckstrom jeweils in der angegebenen Staffelung zunimmt und die Sauerstoffkonzentration an der Korngrenze kontinuierlich zurückgeht (in *Abbildung 2.5*

¹¹ In der Literatur werden verschiedene Durchbruchspannungen für eine einzelne Korngrenze angegeben; sie liegt bei etwa 3,2 bis 3,4 V [Cig2013] oder 3,5 V [GB1990]. Ihr Wert kommt wiederum auf das anfängliche Pulvergemisch und die Temperaturabfolge während des Sinterprozesses an [GST2015].

rechts zu sehen). Letzteres ist aufgrund der durchgeführten Belastungen zu erwarten. Eine Temperaturerhöhung, hier auf Werte von 400 °C bis 600 °C, unterhalb der Sintertemperatur führt zu einer Diffusion des Sauerstoffs aus dem Material. Findet die Erwärmung im Vakuum statt, baut sich der Sauerstoffionenüberschuss noch stärker ab. Eine elektrische Belastung, hier mit einem Spannungsimpuls, führt zu einem weiter ausgeprägtem Abbau von Sauerstoffionen an der Korngrenze. In diesem Fall wandern die Sauerstoffionen aus der Korngrenze Richtung Korninneres, was durch fehlende Defektzustände im Korngrenzbereich zu einer Absenkung der Potentialbarriere und damit zu einer Erhöhung des Leckstromes im unteren Spannungsbereich führt [SBG1987].

Der nachfolgende Abschnitt liefert einen Überblick bezüglich des Einflusses, den die im Rahmen dieser Arbeit auftretenden Belastungen auf die elektrischen Eigenschaften haben können. Hierbei handelt es sich überwiegend um unipolare Belastungen sowie erhöhte Umgebungstemperaturen. Der Einfluss von Wechselspannungsbelastungen auf die elektrischen Eigenschaften hat im Rahmen dieser Untersuchung keine nennenswerte Relevanz und bleibt daher unberücksichtigt.

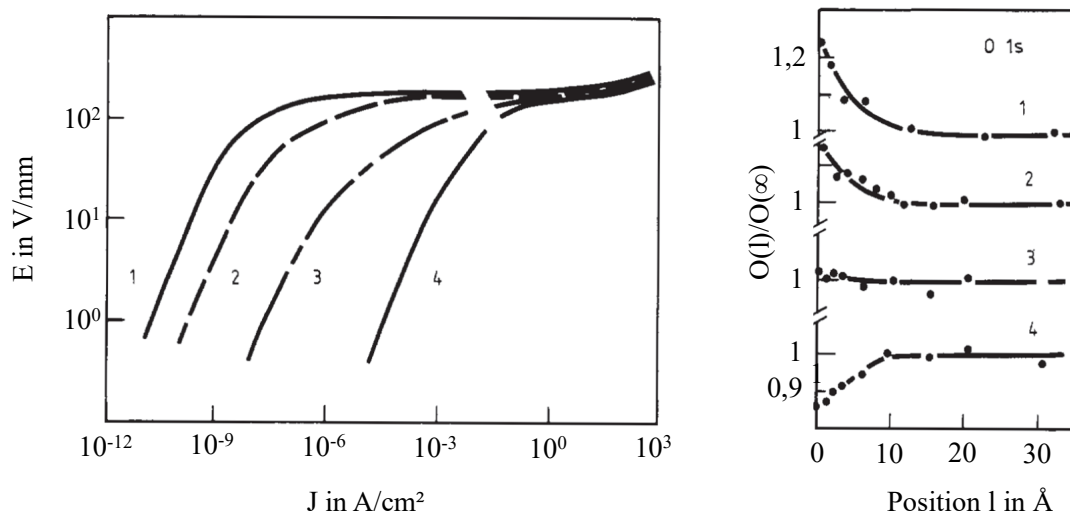


Abbildung 2.5: Darstellung des Zusammenhangs zwischen der E - J -Charakteristik in einem log-log-Plot; links: unterschiedlich belastete MO-Varistoren im unteren Spannungsbereich, rechts: die jeweils zugehörige Sauerstoffkonzentration an der Korngrenze (aufgetragen über der Position gemessen von der Korngrenze). Hierbei stehen die Nummerierungen für folgende Belastungen: 1- unbelastet, 2- zusätzliche Erwärmung nach dem Sintern in Luft, 3- zusätzliche Erwärmung nach dem Sintern im Vakuum und 4- nach elektrischer Beanspruchung [BGR1989, GB1990].

Einfluss der Temperatur

Dauerversuche, die der Untersuchung der Degradation unter definierten Belastungen dienen, werden auch Alterungsversuche genannt und finden im Normalfall unter erhöhten Umgebungstemperaturen statt. Die erhöhten Temperaturen stammen noch aus den Anfängen der IEC-Normung ([IEC60099-4] für Wechselstromanwendungen und [IEC60099-9] für Gleichstromanwendungen) und sollen zu einer Beschleunigung der Vorgänge im Material führen. Hierbei beruft sich die Norm auf das Arrhenius-Gesetz, welches die Temperaturabhängigkeit von physikalischen und chemischen Prozessen beschreibt, und mit dessen Hilfe ein sog. Beschleunigungsfaktor berechnet werden kann. Für einen großen Anteil der damaligen Generation der erhältlichen MO-Varistoren, die über der Zeit einen ansteigenden Leckstrom¹² aufwiesen (*Abbildung 2.6* Typ I in rot), galt diese Annäherung hinreichend [CGS19869]. Aus Untersuchungen [Vic1986] wurden Versuchsdauern von 1 000 h und ein Beschleunigungsfaktor von $2,5^{\Delta T/10}$ für die in der Norm festgelegten Versuche ermittelt, wobei ΔT der Temperaturdifferenz zwischen der maximal zulässigen Betriebstemperatur des Varistors und der Versuchstemperatur entspricht. Mit einer gängigen Versuchstemperatur von 115 °C ergibt sich nach 1 000 h eine Abbildung einer Betriebszeit von 110 Jahren bei einer maximalen Betriebstemperatur von 40 °C [IEC60099-4, IEC60099-9]. Laut der Norm [IEC60099-4] ist es nicht zulässig, die Versuchstemperatur über 115 °C hinaus zu erhöhen oder eine höhere Spannung als die um einen Korrekturfaktor, der die Bauhöhe des gesamten Überspannungsableiters berücksichtigt, erhöhte Dauerspannung anzulegen. Dies wird damit begründet, dass in beiden Fällen andere Mechanismen im Material wirksam sein können, als es innerhalb eines Normalbetriebs der Fall wäre. Damit ginge die Vergleichbarkeit verloren. Temperaturen oberhalb von 200 °C führen, wie bereits eingangs erwähnt, sogar zu einer “Erholung“ der Materialstruktur und könnten so ggf. eine Verzögerung der Degradation hervorrufen.

Der überwiegende Anteil der derzeitig kommerziell vertriebenen MO-Varistoren haben ein geändertes Verhalten, insofern als dass sie über die Versuchszeit immer weiter sinkende Leckströme bzw. Verlustleistungen aufweisen und sich diese bei höheren Temperaturen sogar noch stärker absenken (*Abbildung 2.6* Typ III in grün). Diese Verläufe führen dazu, dass die gängige Vorgehensweise der derzeitigen Norm auf ihre Gültigkeit hin geprüft werden muss, denn die Voraussetzungen für die Anwendung des Arrhenius-Gesetzes könnte hier nicht mehr gegeben sein. In der Literatur [Cig2013] wird allerdings zu bedenken gegeben, dass es durchaus sein kann, dass der Verlustleistungsanstieg nach dem Durchschreiten eines Minimums (*Abbildung 2.6* Typ II in blau dargestellt) durch eine Überlagerung verschiedener Mechanismen zustande kommen kann. Das ließe den Schluss zu, dass nach Abklingen eines

¹² Dies ist gleichbedeutend mit einer ansteigenden Verlustleistung.

anfänglich dominanten Mechanismus, der zu einer Reduzierung der Verlustleistung führt, ein anderer Vorgang im Material dominiert, der für einen erneuten Anstieg sorgt. Letzterer könnte erst nach dem festgelegten Prüfungszeitraum von 1 000 h auftreten und temperaturabhängig sein und damit einem Arrhenius-Gesetz unterliegen. Dieser Zusammenhang steht derzeit noch zur Prüfung aus. Die Autoren von [Cig2013] empfehlen, die derzeitigen Prüfstandards beizubehalten, bis auf Basis fundierter Untersuchungen genauere Aussagen bezüglich der Gültigkeit des Arrhenius-Gesetzes für heute kommerziell erhältliche MO-Varistormaterialien getroffen werden können.

Der Anstieg der Verlustleistung wird der Verschiebung und dem Abbau der Sauerstoffionen in der Korngrenzregion zugeschrieben, wie eingangs beschrieben.

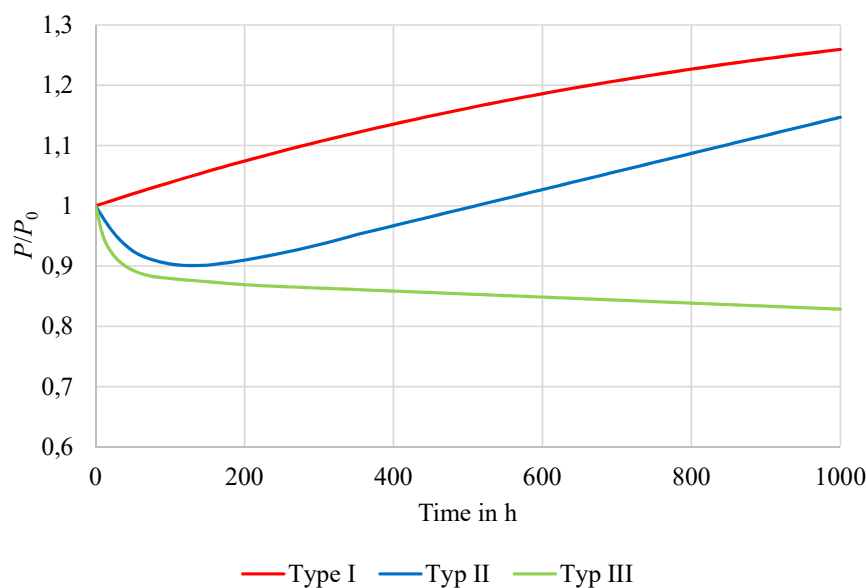


Abbildung 2.6: Prinzipskizze der Entwicklung der Verlustleistung während eines Alterungsversuches bei einer Belastung mit Wechselspannung für drei verschiedene Varistortypen; Typ I: permanenter Anstieg - instabil; Typ II: Anstieg nach Durchlauf eines Minimums unter Einhaltung gewisser Kriterien - instabil; Typ III: stetig absinkend - stabil

Gleichspannungsbelastung

Eine Gleichspannungsbelastung ist eine unipolare Belastung des MO-Varistors. Dies bedeutet einen Stromfluss durch den Varistor in gleichbleibender Richtung. Innerhalb des Materials spielen sich durch das Anlegen einer Gleichspannung verschiedene Abläufe ab. Zunächst verschieben sich die Raumladungszonen innerhalb der Korngrenzen minimal. Während sie auf der positiv polarisierten Seite leicht expandieren, kontrahieren sie auf der

negativ polarisierten Seite [Cig2017, Cla1999]. Dies führt unmittelbar zu einem Verschiebungsstrom. Nach größerer Einwirkzeit kann davon ausgegangen werden, dass eine weitere Stromkomponente auftritt. Diese ergibt sich aufgrund der Besetzungswahrscheinlichkeit der Defektzustände und einer daraus resultierenden Ladungsverschiebung [Cig2017]. Erst nach Abklingen der genannten Stromkomponenten stellt sich ein konstanter Stromfluss ein. Dies kann sich über Zeiträume von Stunden oder Tagen hinziehen [PL1976, MM1990]. Die aufgeführten Mechanismen führen dazu, dass es bei Anlegen einer Gleichspannung zunächst zu einem starken, über die Zeit immer schwächer werdenden Abklingen des Stromes durch den MO-Varistor kommt, wie es auch in *Abbildung 2.7* zu sehen ist.

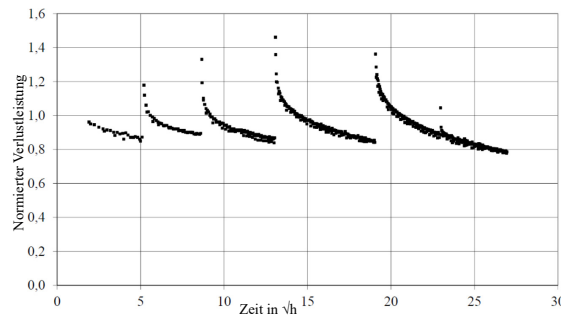


Abbildung 2.7: Messungen aus einem Alterungsversuch nach [IEC60099-9] mit Polaritätswechseln, nach [Cig2017].

Die Darstellung zeigt das Abklingen der normierten Verlustleistung aufgetragen über der Quadratwurzel der Zeit¹³. In zeitlich ansteigenden Intervallen von Polaritätswechseln ist ein deutlicher, wiederkehrender Leistungsanstieg zu sehen. Dieser hängt mit dem jeweils unmittelbar vor Auftreten des Peaks durchgeführten Polaritätswechsel zusammen. Im Augenblick des Polaritätswechsels kehren sich die beschriebenen Mechanismen um, und der Strom fließt in entgegengesetzter Richtung. In *Abbildung 2.7* ist deutlich zu erkennen, dass zum jeweiligen Zeitpunkt der Polaritätsumkehr noch kein stationärer Wert der Verlustleistung erreicht worden ist. Der Wechsel der Belastungsrichtung hat jedoch keinen erkennbaren Einfluss auf die sich einstellende Verlustleistung. Die E - J -Gleichspannungscharakteristik eines MO-Varistors im Vergleich einer unbelasteten zu einer im Anschluss an eine Gleichspannungsbelastung gemessenen zeigt bisweilen starke Veränderungen. Dies wird in *Abbildung 2.8* deutlich. Hier wurden Werte bis zu einer Spannung von 600 V aufgenommen. Beide Darstellungen zeigen hier die Spannung linear aufgetragen über dem logarithmisch skalierten Strom. Es sind jeweils Werte der MO-Varistoren im unbelasteten Zustand und im Anschluss an die Gleichspannungsbelastung zu sehen. In beiden Fällen sind Darstellungen in “forward“

¹³ Eine Darstellungsweise, die in diesem Zusammenhang wie auch bei anderen Diffusionsvorgängen gängig ist.

und in “reversed“ abgebildet. Diese Bezeichnungen beziehen sich auf die Belastungsrichtung während der Charakterisierung. “Forward“ steht hierbei für eine Belastung in der gleichen Richtung, wie sie während der Gleichspannungsbelastung im Dauerversuch vorgelegen hat, und “reversed“ in entgegengesetzter Richtung dazu. Diese Unterscheidung ergibt sich lediglich für Messungen, die im Anschluss an eine unipolare Belastung stattgefunden haben. Für einen unbelasteten sowie einen bipolar belasteten MO-Varistor führen die Messungen in beide Richtungen zu gleichen Ergebnissen (liegen entsprechend übereinander), da die Potentialbarrieren in diesen Fällen symmetrisch sind. Nach einer Gleichspannungsbelastung ist dies nicht mehr der Fall, und die Messungen mit unterschiedlicher Stromrichtung unterscheiden sich, wie beispielhaft in *Abbildung 2.8* zu sehen ist. Die Darstellungen sind insofern verschieden, als dass die Messung auf der linken Seite ein Beispiel für die Degradation eines eher instabilen und die Darstellung auf der rechten Seite die eines eher stabilen Materials wiedergibt, [Gre1995] bzw. [Cig2017].

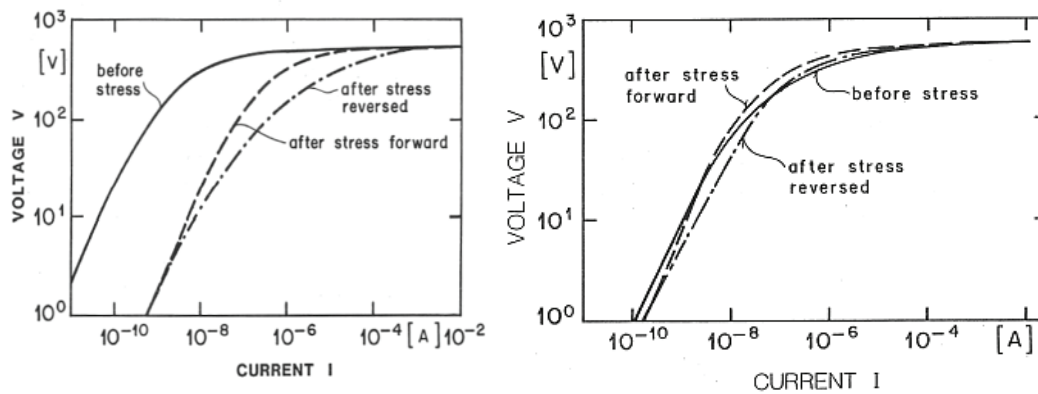


Abbildung 2.8: Veränderung der E - J -Charakteristik nach Gleichstromalterung; links: starke Veränderung - eher instabiles Material; rechts: geringe Veränderungen – eher stabiles Material [Gre1995] bzw. [Cig2017]

Im Fall des instabilen Materials ergibt sich eine durchgängige Erhöhung des Leckstromes, wobei diese entgegen der Belastungsrichtung in Teilen ausgeprägter ist als in gleicher Richtung. Das stabile Material zeigt dagegen im unteren Spannungsbereich noch eine leichte Erhöhung, welche bei steigender Spannung zunächst nur in Belastungsrichtung und bei weiterer Spannungserhöhung auch entgegen der Belastung in eine Reduzierung des Leckstromes übergeht. Untersuchungen von [EIM1980, SBG1987, Gre1995, Cig2017] zeigen eine solche Degradation nach einer Gleichspannungsbelastung und erklären sie ebenfalls mit einer Reduzierung von Sauerstoffionen an den Korngrenzen wie bereits eingangs in diesem Kapitel beschrieben.

Impulsbelastungen

Eine Impulsbelastung ist ebenfalls eine unipolare Belastung. Sie führt aufgrund des meist hohen (im Kilo-Ampere-Bereich liegenden) Stromflusses neben der elektrischen auch zu einer thermischen Belastung. Letztere sorgt aufgrund der schnellen Wärmeentwicklung für mechanische Spannungen im Material. Untersuchungen [Tuc2014, ZFZ1991] und auch [Kle2004] zeigen, dass sich bei einer Impulsbelastung leicht niederohmigere Pfade gegenüber ihrer Materialumgebung als Hauptstrompfade durch den MO-Varistor ausbilden, welche in Folge des dort erhöhten Stromflusses stärker erhitzt werden als die angrenzenden Bereiche. Dieser Aspekt soll hier nicht weiter ausgeführt werden, da er für die vorliegende Arbeit keine Relevanz aufweist. Dennoch wird insbesondere diesem Vorgang die starke Abhängigkeit des Energieaufnahmevermögens des Varistors von der Impulsform zugeschrieben. Beide Belastungsarten (Temperatur und Impulsstrom) können unabhängig voneinander eine unmittelbare Schädigung oder eine langfristige Veränderung der elektrischen Eigenschaften verursachen. Letztere wirken sich auch im Falle eines impulsförmigen Stromes im Kilo-Ampere-Bereich überwiegend auf den Leckstrombereich und nur geringfügig im Restspannungsbereich, welcher dem Strombereich entspricht, in dem auch der Impuls selbst liegt, aus [Den1998, KLN1999, Gup1990, Cig2017]. Aus diesem Grund sollte für die Beurteilung der Beeinflussung der elektrischen Eigenschaften vorwiegend eine Untersuchung des Leckstrombereichs stattfinden. Die Veränderungen im Durchbruchbereich sind vor allem im Hinblick auf den Schutzpegel zu berücksichtigen, zeigen jedoch für die Beurteilung der Degradation weniger Potential.

Abbildung 2.9 zeigt den Verlauf einer Degradation des Leckstromes bei einer angelegten Spannung, die in einem unbelasteten MO-Varistor einen Stromfluss von $0,1 \text{ mA/cm}^2$ verursacht hat. Diese Spannung wurde für jede Messung konstant beibehalten und der sich einstellende Strom aufgenommen, wobei zwischen zwei Messungen jeweils 250 Impulsbelastungen von 100 A/cm^2 stattgefunden haben. Die Messungen wurden auch hier sowohl in Richtung der Impulsbelastung (“forward“) als auch in entgegengesetzter Stromrichtung (“reversed“) aufgenommen und zeigen eine stärkere Degradation für die entgegengesetzte Stromrichtung. Dies wird durch verschiedene Autoren bestätigt [KM1978, SP1979, Gup1990, BT1995]. Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere die erste eingeprägte Impulsbelastung für eine Veränderung der elektrischen Eigenschaften sorgt und spätere Belastungen gleicher Form und Energiedichte einen wesentlich geringeren Beitrag hierzu leisten [Chr2001]. Die Vorgänge, die sich innerhalb des Materials abspielen, sind vermutlich die gleichen wie auch bei der Beeinflussung durch eine Gleichspannung. Dies kann vor allem an dem beeinflussten Strombereich festgemacht werden [Gup1990]. Da es sich in dem unteren Strombereich der Kennlinie um einen durch die Korngrenzen bestimmten Leitungsmecha-

nismus handelt, ist erneut eine Verformung der Potentialbarriere, welche das Resultat einer Bewegung von Ionen und Defektzuständen ist, ursächlich für die Degradation.

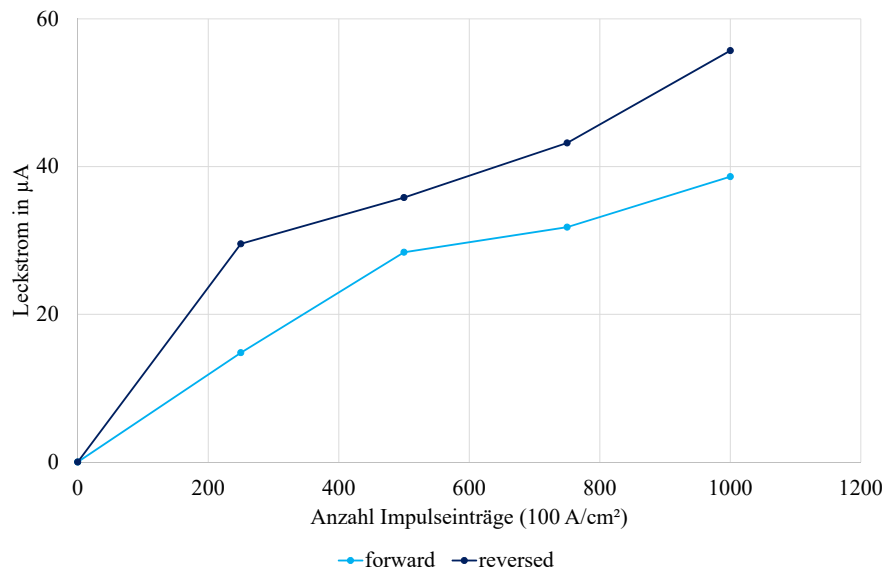


Abbildung 2.9: Veränderung des Leckstromes bei einer angelegten Spannung, die im unbelasteten Material einen Stromfluss von $0,1 \text{ mA/cm}^2$ verursacht hat, nach wiederholter Impulsbelastung von 100 A/cm^2 (nach [BT1995]).

Einfluss der Stromform auf das Energieaufnahmevermögen

Ein wichtiger Punkt, der zu der innerhalb dieser Arbeit vorgestellten Untersuchung führt, ist die Frage, inwieweit die Impulsströme, die während eines Schaltvorgangs in einem Gleichstromschalter entstehen, aufgrund ihrer Form problematisch für das Betriebsverhalten der MO-Varistoren sein könnten. Verschiedene Studien legen nahe, dass es durch die Belastung der Varistoren durch Stromimpulse höherer Energiedichte und Stromsteilheit zu einer Beeinträchtigung des Energieaufnahmevermögens kommen kann [Den1998, Kle2004, Tuc2014, Cig2017]. Aufgrund dieses Aspektes ist die Frage zu untersuchen, inwieweit die MO-Varistoren bei wiederholten Impulsstrombelastungen mit einer bislang wenig untersuchten Stromform ihre Schutzfunktion verändern und ggf. verlieren.

Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass neben den mit kürzeren Stromanstiegszeiten verbundenen, stärkeren magnetischen Kräften auch der Einfluss mechanischer Spannungen, die durch die Temperaturanstiege infolge der Stromeinträge entstehen, wahrscheinlicher wird. Sie treten zusätzlich zu den unabhängig von der Stromanstiegszeit vorhandenen thermischen Wirkungen auf.

2.1 Einsatz und betriebsbedingte Belastung von MO-Varistoren

Z. B. führt [Kle2004] Untersuchungen an MO-Varistoren mit Impulsen der Formen $4/10\text{ }\mu\text{s}$, $8/20\text{ }\mu\text{s}$ und $30/60\text{ }\mu\text{s}$ durch. Für die Beurteilung des Einflusses von beiden genannten Parametern erfolgen Impulsstromeinträge der drei Formen bei verschiedenen Energiedichten (*Abbildung 2.10*). Die Darstellung zeigt die Änderung der normierten Referenzspannung ($U_{\text{ref, bel}}$ nach Belastung zu $U_{\text{ref, 0}}$ vor der Belastung) in Abhängigkeit von der normierten Energiedichte, die ein Impulsstrom in einen MO-Varistor einbringt, wobei sich der Bezugswert der Normierung w_0 auf die Energiedichte bezieht, die ein normgerechter Hochstromimpuls in den Varistor einprägt. Es zeigt sich, dass sich die Referenzspannung bei Belastungen mit Impulsen der Form $4/10\text{ }\mu\text{s}$ bereits bei kleineren Energiedichten absenkt, als es bei den langsameren Stromeinträgen der Fall ist. Des Weiteren zeigen die Verläufe aller drei untersuchten Stromformen eine Abnahme der Referenzspannung mit ansteigendem Energieeintrag. Somit ergibt sich aus den Messergebnissen die Schlussfolgerung, dass sowohl ein höherer Energieinhalt als auch eine hohe Stromsteilheit der eingetragenen Impulsströme zu einer Absenkung der Referenzspannung führen. Die Begründung liegt in dem Abbau von Sauerstoffionen an der Korngrenze, was auch von [VNJ1991] in seiner Untersuchung geschlussfolgert wurde. Dies zieht wiederum eine Beeinträchtigung der thermischen Stabilität¹⁴ nach sich, da es zu höheren Stromflüssen kommt. *Abbildung 2.10* spiegelt die Erhöhung des Stromes nicht unmittelbar wieder. Es gilt zu beachten, dass sich die E - J -Charakteristik für Spannungen oberhalb der Referenzspannung stark nichtlinear entwickelt (*Abbildung 2.2*). Somit führen bereits geringe Überschreitungen der Referenzspannung in diesem Kennlinienbereich zu erheblichen Stromanstiegen.

Eine Bestätigung dieser Ergebnisse findet sich ebenfalls in [Den1998]. Es erfolgen Impulsbelastungen der Form $0,5/80\text{ }\mu\text{s}$, $1/20\text{ }\mu\text{s}$, $4/10\text{ }\mu\text{s}$ und $8/20\text{ }\mu\text{s}$. Die Impulsbelastungen werden bis zu 1 500 mal wiederholt. Bei gleicher Energiedichte führen steilere Stromanstiege zu einer größeren Erhöhung der Verlustleistung. Ebenso verhält es sich für höhere Energiedichten bei gleichbleibender Stromform. Zusätzlich stellt sich in den Untersuchungen heraus, dass der erste eingetragene Stromimpuls zu den stärksten Änderungen der E - J -Charakteristik führt.

Auch [Cig2017] zeigt eindeutige Beeinflussungen des Energieaufnahmevermögens durch die Impulsstromform sowie die Energiedichte des Energieeintrags und basiert dabei auf den Ergebnissen von [Rei2008, Tuc2014].

¹⁴ Das Gleichgewicht aus Energiezu- und abfuhr ist nicht mehr gegeben, was zu einer andauernden Erwärmung des MO-Varistors bis zu seiner Zerstörung führen kann.

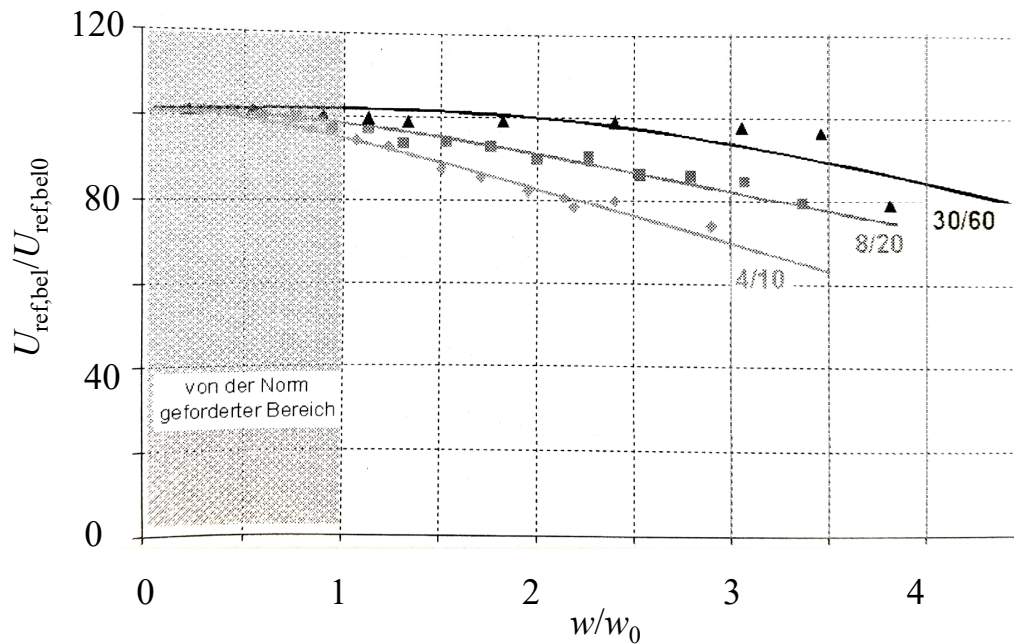


Abbildung 2.10: Darstellung der Veränderung der Referenzspannung U_{ref} (bei konstantem Referenzstrom) vor ($U_{ref,0}$) und nach ($U_{ref,bel}$) Belastungen mit Impulsströmen verschiedener Form in Abhängigkeit von der Energiedichte w mit w_0 als der Energiedichte, die in einen Varistor bei Impulsbelastung mit einem normgerechten Hochstromimpuls eingetragen wird [Kle2004].

2.2 Grundsätzliche Funktionsweise eines Gleichstromschalterkonzepts

In einem Wechsel- wie auch in einem Gleichstromnetz ergeben sich grundsätzlich die gleichen Anforderungen an ein Schaltgerät. Neben einem möglichst störungsfreien Übergang von dem ein- in den ausgeschalteten Zustand oder umgekehrt sind ein minimaler Durchgangswiderstand sowie eine ausreichend hohe Spannungsfestigkeit essentiell. Die etablierten Schalterkonzepte aus der Wechselstromtechnik finden dennoch keine direkte Anwendung in der Gleichstromtechnik. Die Begründung hierfür liegt im systembedingten Nichtvorhandensein eines natürlichen Stromnulldurchgangs in einem Gleichstromsystem, auf dem das Funktionsprinzip der Wechselspannungsschalter beruht. Schon Ende der 1980iger sowie in den 1970iger Jahren fanden Untersuchungen zu Gleichstromschalterkonzepten statt [EHL1976]. Diese wurden jedoch, mit Ausnahme der Anwendung im Bahnstrombereich (wenige Kilovolt), nicht weiter verfolgt. Derzeit liegen im Bereich der

Mittel- und Hochspannungstechnik Schalterkonzepte verschiedene Hersteller vor [CBA2012, SIE2014, Hei2017a, Hei2017b]. Einen Überblick zu den verschiedenen Schalterkonzepten ist in [Hei2017] gegeben. Diese befinden sich allerdings noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase. Die Konzepte unterscheiden sich insofern, als dass sie aus einer Kombination eines mechanischen Schalters mit einem elektronischen Schalter (Hybrides Schalterkonzept) oder aus einer Anordnung, die einen künstlichen Stromnulldurchgang erzeugt (mechanisches Schalterkonzept), bestehen. Die Darstellung eines Schalterkonzeptes in der Ausführung mit einem elektronischen Schalter ist in *Abbildung 2.11* zu sehen. Grundsätzlich ist den vorhandenen Konzepten gemein, dass sie ein Element für die Absorption der in den Netzinduktivitäten gespeicherten Energie benötigen [Wal2013, SLF2016, Hei2017]. Ein Überspannungsableiter, der im Einzelnen aus MO-Varistoren aufgebaut und hier mit *MOV* bezeichnet ist, kann grundsätzlich diese Aufgabe übernehmen. Die Funktionsweise der unterschiedlichen hybriden Schalterkonzepte gestaltet sich grundsätzlich gleich, wobei sich die Ausführungen unterscheiden. Diese Konzepte bestehen aus einem Hauptstrompfad, der aus einem mechanischen Schalter S_m und einem aus leistungselektronischen Elementen aufgebauten elektrischen Schalter S_H , wie es in *Abbildung 2.11* zu sehen ist. Der mechanische Schalter stellt nach Abschluss des Schaltvorgangs die tatsächliche Trennstrecke her. Zudem ist ein Kommutierungspfad mit dem Kommutierungsschalter S_K enthalten, der den Stromfluss zeitweise übernimmt. Wichtig für die ordnungsgemäße Funktion des Schalters ist auch bei diesem Konzept das Vorhandensein eines parallelen energieaufnehmenden Elementes (*MOV*), das dazu in der Lage ist, die in den Netzinduktivitäten gespeicherte Energie zu absorbieren. Der Unterschied zu weiteren hybriden Schalterkonzepten liegt in einem zusätzlichen leistungselektronischen Schalter im Hauptstrompfad, welcher die Kommutierung des Stromes in den Kommutierungspfad und damit ein nahezu stromloses Schalten des mechanischen Schalters im Hauptstrompfad ermöglicht. Durch das Abschalten des Halbleiters im Hauptstrompfad und das gleichzeitige Einschalten des Halbleiterschalters im Kommutierungspfad wird der Widerstand im Hauptstrompfad so weit angehoben, dass der Strom auf den niederohmigeren Kommutierungspfad wechselt. Gleichzeitig kann der mechanische Schalter im Hauptstrompfad stromlos öffnen und eine ausreichend große Trennstrecke für die Isolation der Spannung herstellen. Während des weiteren Schaltverlaufs schaltet der Halbleiterschalter im Kommutierungspfad wieder aus und die Spannung baut sich über dem Schalter auf, bis die Durchbruchspannung des Überspannungsableiters erreicht ist. Bei Erreichen dieser Spannung fließt ein hoher Strom durch den Energie aufnehmenden Pfad, und die im Netz gespeicherte Energie kann in Form von Wärme durch den Überspannungsableiter abgeführt werden. Dabei muss der Halbleiter im Hauptstrompfad den vollständigen Betriebsstrom führen, jedoch nicht die gesamte Spannung ausschalten können.

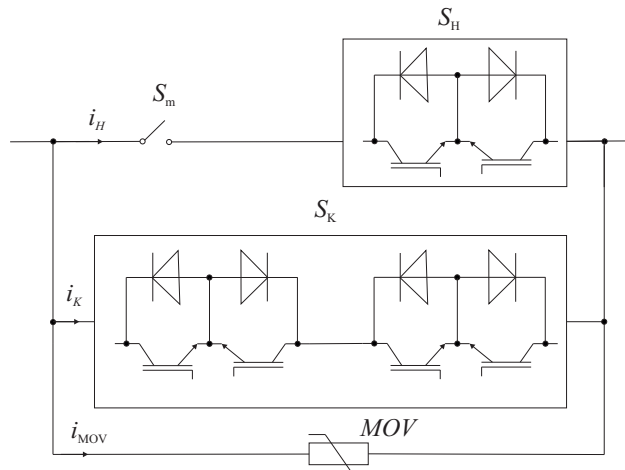


Abbildung 2.11: Beispielhaftes hybrides Gleichstromschalterkonzept mit strombegrenzendem Element im Hauptstrompfad und Überspannungsableiter im Parallelpfad. Mit S_m dem mechanischen Schalter im Hauptpfad; S_H dem leistungselektronischen Schalter im Hauptpfad; S_K dem leistungselektronischen Kommütierungsschalter im Kommütierungspfad und MOV dem Energie absorbierenden Element. Nach [CBA2012, Wal2013, HHJ2015, Hei2017]

Der Kommütierungspfad ist so ausgelegt, dass er die vollständige Betriebsspannung abschalten, aber nur kurzzeitig den Betriebsstrom führen kann. Der während eines Ausschaltvorgangs auftretende Strom (gelb)- und Spannungsverlauf (grau) am Gleichstromschalter, inklusive des Stromverlaufes durch den Überspannungsableiter (blau) ist beispielhaft in *Abbildung 2.12* dargestellt. Diese Grafik, wie auch die vorhergehende *Abbildung 2.11*, bilden nicht ab, dass in konventionellen Schalterkonzepten ein vorgelagerter Lasttrennschalter vorgesehen ist, der im Anschluss an den eigentlichen Ausschaltvorgang durch den Gleichstromleistungsschalter diesen von der Netzspannung trennt und somit auch den MO-Varistor von der Netzspannung nimmt. Dies sorgt dafür, dass der MO-Varistor im Normalfall keiner Gleichspannung ausgesetzt wird. Vorstellbar sind jedoch Konstellationen, die von einem vorgelagerten Lasttrennschalter absehen. Dieses Szenario ergäbe sich beispielsweise innerhalb kleiner Inselnetze aus Platz- oder Kostengründen¹⁵, aber auch im Falle deutlich gehäufte Schalthandlungen, z. B. in Photovoltaikanlagen, hier könnte dies ebenfalls Anwendung finden.

¹⁵ Entsprechende Realisierungen existieren bereits, dürfen an dieser Stelle aus Geheimhaltungsgründen jedoch nicht näher benannt werden.

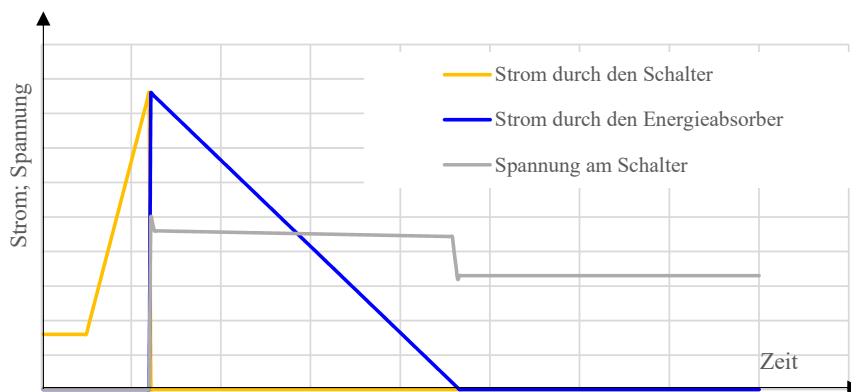


Abbildung 2.12: Beispielhafter Stromverlauf durch den Energieabsorber (blau) sowie der Stromfluss durch den Schalter (gelb) und der Spannungsverlauf (grau) für ein hybrides Gleichstromschalterkonzept mit Strombegrenzer im Hauptstrompfad. Nach [CBA2012]

Stromverläufe durch den Überspannungsableiter, wie sie in *Abbildung 2.12* zu sehen sind, lassen sich auch in [Fra2011], gewonnen aus Simulationen, und in [JN1983] aus Messungen mit Silizium-Carbid-Ableitern (SiC) finden. Es zeigt sich jeweils eine geringe Stromanstiegszeit, was in einer entsprechend hohen Stromsteilheit resultiert, und eine wesentlich längere Rückenhalbwertszeit für die Impulsbelastung des MO-Varistors, als sie bei den typischen Überspannungsableiterbelastungen in Wechselspannungsnetzen auftreten. Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in *Kapitel 2.3*. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Stromverlauf durch den Überspannungsableiter in einem mechanischen Schalterkonzept, bei dem dem Strom eine Schwingung überlagert wird, um einen künstlichen Stromnulldurchgang zu erzeugen, ebenfalls eine überlagerte hochfrequente Schwingung aufweist¹⁶.

2.3 Belastung von MO-Varistoren in Gleichstromschaltern

MO-Varistoren werden für den Betrieb in einem Wechselspannungsnetz, in dem sie insbesondere investitionsintensive Betriebsmittel schützen, nach IEC-Norm [IEC60099-4] geprüft. Innerhalb der Typprüfungen werden sie u. a. einem Dauerversuch unter Wechselspannung sowie auch verschiedenen Impulsströmen ausgesetzt. Die Impulsströme (sofern es sich nicht um rechteckförmige Ströme handelt) haben eine genau definierte Form, welche sich über die Anstiegs- und die Rückenhalbwertszeit definiert (*Abbildung 2.13*). Darin sind $T_1 = 1,25 \cdot (T_{90\%} - T_{10\%})$ die Anstiegs- und $T_2 = T_{50\%} - T_{0,1}$ die Rückenhalbwertszeit. Neben

¹⁶ Die Nachbildung eines mit einer Schwingung überlagerten Verlaufes erfolgte im Rahmen dieser Arbeit nicht. Die Begründung hierfür liegt darin, dass der Energieeintrag nur unwesentlich von einem gemittelten Strom abweicht.

den Impulsströmen kommen auch Sinus-Halbwellen¹⁷- und rechteckförmige Ströme zu Prüfzwecken zum Einsatz. In *Abbildung 2.13 b)* ist die Darstellung eines Rechteckimpulses, wie er z. T. für die Prüfung des Ladungstransfervermögens zum Einsatz kommt, zu sehen. Hier entspricht die virtuelle Dauer des Strompeaks T_d der Zeit während der der Impuls oberhalb von 90 % seines maximalen Wertes liegt. Die virtuelle absolute Dauer T_t stellt die Zeit dar, während der der Strom höher als 10 % seines maximalen Wertes liegt.

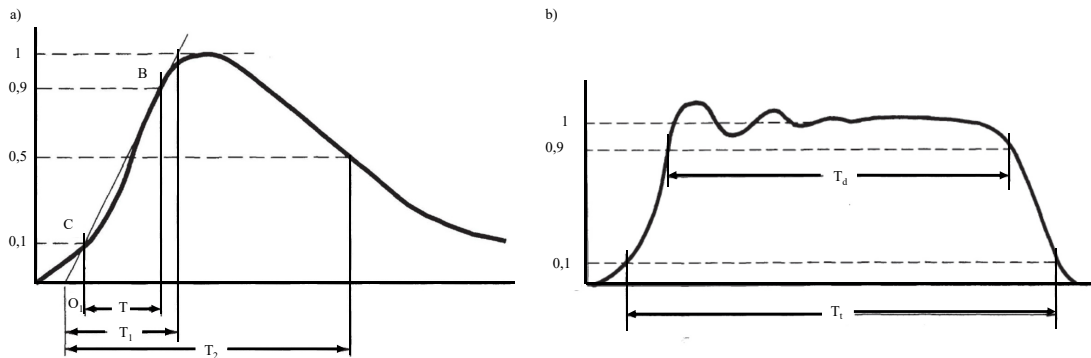


Abbildung 2.13: a: Darstellung eines Stromprüfimpulses über der Zeit nach [IEC60060-1] mit den Markierungen, die für die Berechnung der Anstiegszeiten T_1 und der Rückenhalfwertszeit T_2 herangezogen werden, inklusive dem virtuellen Impulsbeginn 0_1 . b: Darstellung eines rechteckförmigen Stromes nach [IEC60060-1] mit den Markierungen für die virtuelle Dauer des Strompeaks T_d und der virtuellen absoluten Dauer T_t

In der IEC-Norm [IEC60099-4] werden unterschiedliche Impulsstromformen benannt, wie z. B. 4/10 μ s, 8/20 μ s, wobei die jeweils erste Zahl für die Anstiegs- und die zweite für die Rückenhalfwertszeit steht.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, kommt es im Fall des Einsatzes von MO-Varistoren in Gleichstromschaltern zu einer anderen Belastungsform, als sie im herkömmlichen Einsatzgebiet üblich sind [JN1983; Wal2013; BPS2018]. Hierbei ist mit wesentlich steileren Impulsanstiegen zu rechnen. Zudem treten die Belastungen häufiger auf. Während ein herkömmlich eingesetzter Überspannungsableiter innerhalb seiner Lebensdauer in der Regel nur wenige zehn bis hundert Mal mit Blitzströmen, Leitungsentladungsströmen u. ä., im Labor nachgebildet durch die beschriebenen Stromformen, belastet wird, finden Schalthandlungen wesentlich hochfrequenter statt, mitunter auch mehrfach hintereinander, wie es bei einem O-C-O-Ablauf¹⁸ der Fall ist. Ein Wechselstromschalter wird mitunter auf eine

¹⁷ Mit einer Basiszeit von 200 bis 230 μ s

¹⁸ “Open-Close-Open“ dabei handelt es sich um eine Abfolge von Schalthandlungen, bei der ein Fehler detektiert und aufgrund dessen ein Schalter geöffnet wird. Da insbesondere im Freileitungsnetz eine große Anzahl [LH1995] an Fehlern selbst löschend ist, schließt man den Schalter unmittelbar im Anschluss an

2.3 Belastung von MO-Varistoren in Gleichstromschaltern

Lebensdauer von 10 000 Schalthandlungen geprüft [IEC62271-100]. Der Einsatz eines MO-Varistors als Energie absorbierendes Element sollte die Lebensdauer des gesamten Schalters nicht herabsetzen und daher eine ähnlich große Anzahl an Schalthandlungen und damit verknüpften Energieeinträgen ohne Schädigung bewältigen können. Eine reine Gleichspannungsbelastung des MO-Varistors erfolgt innerhalb eines planmäßigen Ausschaltvorgangs des Gleichstromschalters mit vorgelagertem Trennschalter nur bis zu dem Zeitpunkt, bis letzterer den Gleichstromschalter vom Netz trennt. Nur im Fall einer Fehlfunktion des vorgelagerten Trennschalters oder in Konfigurationen ohne Trennschalter ist das anders. Da eine Prüfung der Funktionsfähigkeit eines Betriebsmittels für gewöhnlich den schlechtest anzunehmenden Fall, sprich die maximal anzunehmende Belastung abbildet, muss ein MO-Varistor sowohl den Stromimpulsen, die im Rahmen des Ausschaltvorgangs entstehen, als auch einer im Anschluss daran anliegenden betriebsbedingten Gleichspannung stand halten können und darf sein Betriebsverhalten nicht maßgeblich¹⁹ verändern. Aufgrund dessen kommt es zu einem Prüfzenario, welches dem in [JN1983] beschriebenen ähnelt und welches im weiteren Verlauf in *Kapitel 4* detailliert beschrieben ist.

Zusammenfassend lassen sich die Unterschiede in den auftretenden Belastungen bei Einsatz in einem Wechselspannungsnetz gegenüber dem in einem Gleichstromleistungsschalter in *Tabelle 2.1* darstellen.

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der beiden Belastungsszenarien bei Einsatz eines MO-Varistors in einem Wechselspannungssystem gegenüber dem in einem Gleichspannungssystem

Belastung	Wechselspannungsnetz	Gleichspannungsschalter
Art	Blitz- und Schaltstoßspannungen und Wechselspannung bekannter Form	Impulsspannungen noch ungeklärter Form und Gleichspannung
Häufigkeit des Auftretens	wenige mal (10 bis 100) während der Lebensdauer	mindestens 10 000 mal während Lebensdauer [IEC62271-100]
Belastungsintervall	großer zeitlicher Abstand	ggf. wenige Sekunden

das Öffnen wieder. Sollte der Fehler noch immer vorhanden sein, erfolgt eine erneute Schalthandlung, um den Schalter endgültig zu öffnen.

¹⁹ Eine genaue Definition zulässiger Veränderungen der E - J -Charakteristik für die hier betrachtete Betriebsart der Varistoren steht derzeit noch aus.

Degradation bei Belastung von MO-Varistoren in Gleichstromschaltern

Der nachfolgende Abschnitt orientiert sich insbesondere an [JN1983]. Die genannte Untersuchung befasst sich mit dem Einsatz eines MO-Varistors damaligen Standards in einem Gleichstromschalter, dessen Funktion auf Thyristoren basiert. Die Ergebnisse wurden erzielt durch den Einbau eines Ableiterstacks²⁰ in einen betriebsbereiten Gleichstromschalter, der bis zu 10.000 mal einen Ausschaltvorgang bei einer Betriebsspannung von 1 500 V durchführt. Der genaue Versuchsaufbau ist in *Abbildung 2.14* dargestellt. Zu sehen ist ein hybrides Gleichstromschalterkonzept, dessen Funktionsprinzip dem in *Kapitel 2.2* beschriebenen gleicht. Die leistungselektronischen Komponenten sind durch Thyristoren (MTHF, MTHB und AT_h) realisiert. Die Ströme werden mit Hilfe der Shunts Sh₁-Sh₃ in jedem Pfad gemessen, wobei die Messung in dem Energie aufnehmenden Pfad mit dem Überspannungsableiter NR für jede darin enthaltenen MO-Varistorsäule einzeln aufgenommen wird. Dies ist nicht aus dem Ersatzschaltbild ersichtlich. Es lässt sich erst bei der Betrachtung der gemessenen Strom- und Spannungsverläufe während eines Ausschaltvorgangs in *Abbildung 2.15* erkennen. Deutlich erkennbar ist der nahezu dreieckförmige Impulsstromfluss durch das Varistorstack, welcher eine Gesamtamplitude von 4 800 A erreicht und eine Dauer von etwa 48 ms aufweist. Sowohl vor der Schalthandlung als auch im Nachhinein liegt in diesem Fall die betriebsmäßige Gleichspannung an den MO-Varistoren an. Es ergibt sich in Folge dessen eine Kombination aus einer Impuls- und einer Gleichstrombelastung. Zusätzlich dargestellt sind die Stromverläufe durch die einzelnen Varistorsäulen, gekennzeichnet mit NR₁ bis NR₁₀. Der Einfluss der gezeigten Belastung auf den Leckstrom- und den Durchbruchbereich der *U-I*-Kennlinie kann nachfolgend der *Abbildung 2.16* entnommen werden. *Abbildung 2.16 a)* zeigt die Degradation im Leckstrombereich für verschiedene Ströme im Bereich von 10 µA bis zu 10 mA logarithmisch aufgetragen über der Anzahl der Impulsbelastungen. Eine Impulsbelastung entspricht im Rahmen dieser Messungen einem Impuls mit 500 A Amplitude und einem Energieeintrag von 20 kJ pro Varistor, wie sie auch in *Abbildung 2.15* für die einzelnen MOV-Varistoren zu sehen sind. Die Spannungen, die für das Erreichen des vorgegebenen Stromes notwendig sind, werden mit der Anzahl der Belastungen immer geringer, bzw. der Strom steigt bei konstant gehaltener Spannung im Leckstrombereich mit zunehmender Anzahl der Belastungen immer weiter an. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die Änderungen umso größer ausfallen, je geringer der betrachtete Strombereich ist. Mit sinkendem Strom wird die Charakteristik demnach zunehmend sensibler gegenüber Veränderungen durch die elektrischen Belastungen. Während es bei Untersuchungen zu der Degradation durch Gleichspannung oder reiner Impulsbelastung schwierig ist, vergleichbare

²⁰ Mehrere MO-Varistoren werden in Reihe zu einer Säule zusammengebaut und von diesen Säulen werden wiederum mehrere parallel betrieben. Hier vier Varistoren in Reihe und zehn Säulen parallel.

Darstellungen der Veränderungen im Durchbruchbereich der Charakteristik in der Literatur zu finden, zeigt *Abbildung 2.16 b)* die Degradation der U - I -Kennlinie in diesem Bereich.

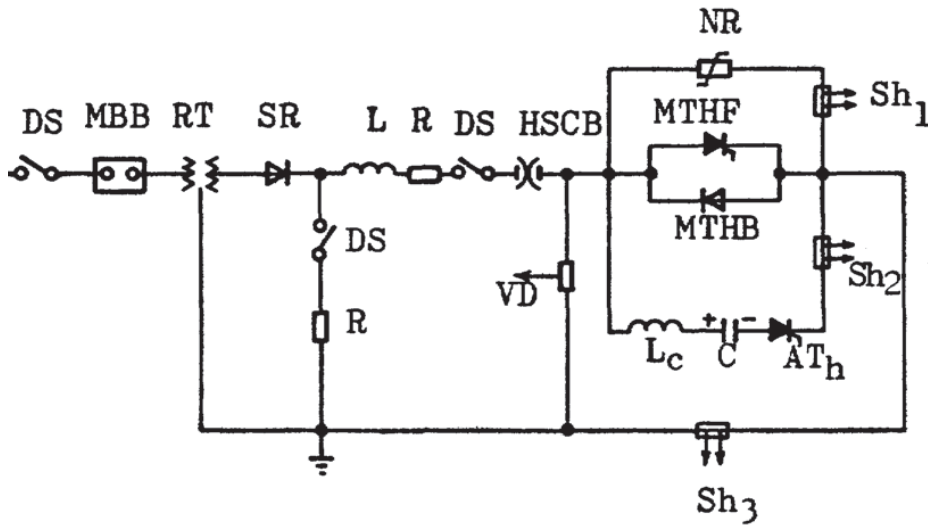


Abbildung 2.14: Ersatzschaltbild des Versuchsaufbaus einer Untersuchung zur Belastbarkeit von MO-Varistoren in einem Gleichstromschalter basierend auf Thyristoren von [JN1983]. Die Bezeichnungen in der Abbildung stehen für:

DS: Trennschalter; MBB: Wechselstromschalter; RT: Transformator; SR: Gleichrichterdioden; R : Widerstand; L : Induktivität; HSCB: Hochgeschwindigkeitsgleichstromschalter; NR: MO-Varistorstack; MTHF und MTHB: Hauptthyristoren; Sh_1 - Sh_3 : Stromshunts; L_c : Kommutierungsinduktivität; C : Kommutierungskapazität; AT_h : Hilfthyristor; VD: Spannungsteiler

Auch für diesen Kennlinienbereich wird die Restspannung über der logarithmisch aufgetragenen Anzahl der Impulse dargestellt. Der Verlauf spiegelt einen Anstieg der Restspannung mit steigender Anzahl eingetragener Impulse wieder. Dies bedeutet, dass sich durch die wiederkehrende Impulsbelastung die Restspannung immer weiter erhöht. Das führt dazu, dass sich der Schutzpegel verändert und somit die zu schützenden Betriebsmittel einer ansteigenden Spannung ausgesetzt werden. Bei dem innerhalb dieser Untersuchung eingesetzten Material kommt es zu einem Anstieg von 9 % der Restspannung. Da der Schutzpegel die von den Herstellern garantierte Basis der Isolationskoordination ist, ist ein Anstieg desselben grundsätzlich nicht gestattet. Die IEC-Normung [IEC60099-4], für den Einsatz von MO-Varistoren in Wechselspannungsnetzen, lässt einen Anstieg von 5 % zu. Dieses Ausmaß nehmen die Veränderungen des Schutzpegels moderner Varistormaterialien nicht an [Cig2013]. Die in *Abbildung 2.16* zu sehende Anstieg wäre laut Norm für den Betrieb im Wechselspannungsnetz nicht zulässig.

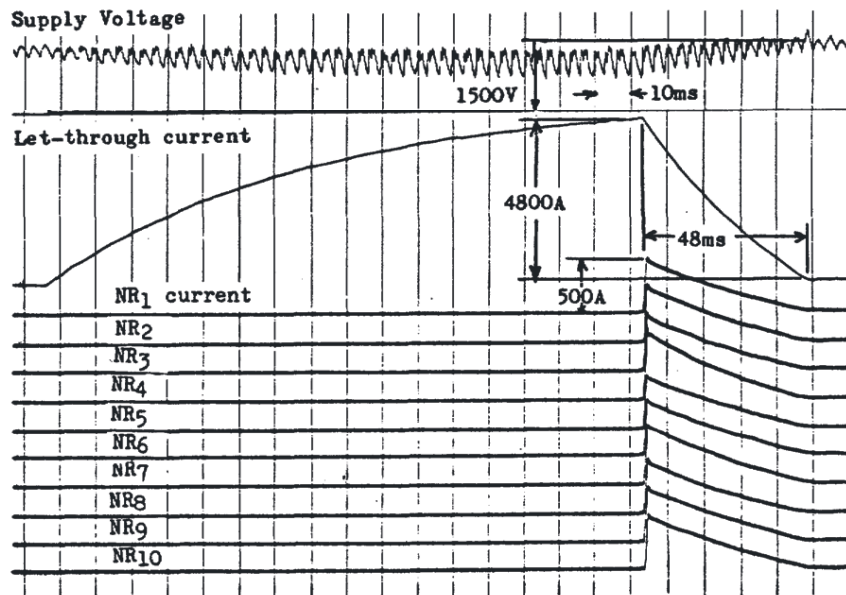


Abbildung 2.15: Verläufe der Ströme und Spannungen bei einem Ausschaltvorgang in dem in *Abbildung 2.14* dargestellten Versuchsaufbau. Gezeigt werden von oben nach unten die Versorgungsspannung, der Gesamtstrom, sowie eine Einzeldarstellung der Ströme durch jede einzelne MO-Varistorsäule (NR_1 - NR_{10}) im Varistorstack [JN1983].

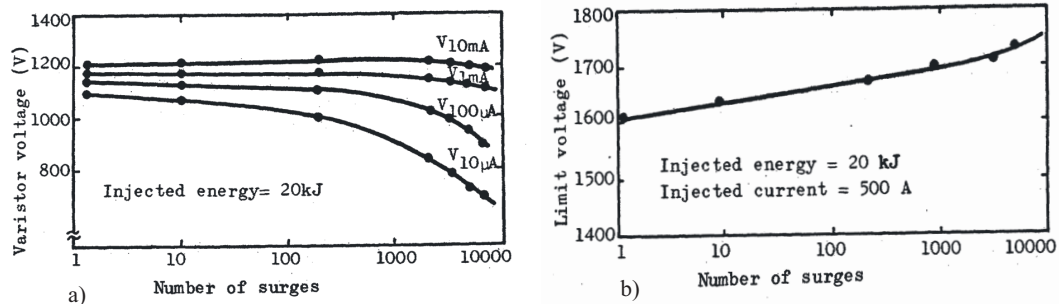


Abbildung 2.16: Einfluss einer kombinierten Impuls- und Gleichstrombelastung auf a) den Leckstrombereich und b) den Durchbruchbereich der U - I -Kennlinie [JN1983].

2.3 Belastung von MO-Varistoren in Gleichstromschaltern

Die Kombination der Belastungen durch eine Gleichspannung- und eine Impulsbelastung scheint, den gezeigten Ergebnissen zu Folge, keine andere Wirkung auf den Leckstrombereich im Material hervorzurufen, als es die Belastungen jeweils für sich gesehen tun. Der Durchbruchbereich zeigt bei einer Belastungskombination im Gegensatz zu getrennt untersuchten Belastungen eine Veränderung.

Die derzeit erhältlichen MO-Varistoren verhalten sich, verglichen mit den Varistoren von vor 35 Jahren, mutmaßlich anders, wie bereits im Rahmen der Diskussion des Temperatureinflusses eingangs beschrieben. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich die dargestellten Ergebnisse aus [JN1983] zwangsläufig in den Untersuchungen dieser Arbeit wiederfinden. Dies liegt insbesondere in der voranschreitenden Optimierung des Varistormaterials sowie dessen Herstellung.

3 Motivation und Ziele der Arbeit

Kapitel 2.3 stellt eine Untersuchung vor, die sich mit dem Betrieb von MO-Varistoren in einem Gleichstromschalter befasst. Hierbei handelt es sich um eine Studie aus dem Jahr 1983. Gleichstromschalter wurden seitdem überwiegend in Bahnanwendungen eingesetzt. Seit den 1980er Jahren haben sich sowohl die Schalterkonzepte durch die Weiterentwicklung neuer leistungselektronischer Bauelemente, wie dem IGBT²¹ und dem IGCT²², als auch die MO-Varistoren durch eine Optimierung der Materialzusammensetzung und der Herstellungsverfahren verbessert. Zudem ist die angeführte Untersuchung beschränkt auf das Material eines Herstellers und strebt keine allgemeine Aussage bezüglich der Beeinflussung der elektrischen Eigenschaften der MO-Varistoren durch die im Gleichstromschalter auftretenden Belastungen an.

Hinzu kommt, dass sich keine Rückschlüsse aus den Erfahrungen mit MO-Varistoren für den konventionellen Einsatz ziehen lassen, da es sich bei den Beanspruchungen innerhalb eines Schaltvorgangs in einem Gleichstromschalter um gänzlich andere Belastungen handelt. Mitunter können verschiedene Stromformen bei einer Impulsstrombelastung durchaus zu unterschiedlichen Auswirkungen führen [Cig2013] und [Tuc2014]. Lediglich die Derating-Kurven²³, die für das Material mancher Hersteller vorliegen, lassen vermuten, dass die Varistoren bei einer Beanspruchung von bis zu 10 000 Impulsströmen nur weit unterhalb ihrer maximalen Betriebsgrenzen eingesetzt werden können. Aufgrund dieser Tatsache und da keine weiteren, mit [JN1983] vergleichbaren Untersuchungen vorliegen, lässt sich mit dem aktuellen Kenntnisstand die Einsatzfähigkeit heute kommerziell erhältlicher MO-Varistoren in zukünftig realisierten Gleichstromleistungsschalterkonzepten also nicht voraussetzen oder in ausreichender Weise beurteilen. Das bedeutet, dass die Varistoren auf die zu erwartenden Belastungen hin zu prüfen sind.

²¹ Eine Weiterentwicklung des MOSFETs mit einer Sperrspannungen von bis zu 6,5 kV und Durchlassströmen von bis zu 3,6 kA

²² Eine Weiterentwicklung des GTOs mit geringeren Durchlassverlusten; kann bei höheren Spannungsanstiegsraten betrieben werden, was den Einsatz von zusätzlichen Snubbern weitestgehend unnötig macht.

²³ Sie geben die Herabsetzung der maximal möglichen energetischen Auslegung bei ansteigender Anzahl an Impulsströmen an.

Die vorliegende Arbeit schließt diese Wissenslücke und trägt damit ein Stück weit zu der Realisierung eines Gleichstromschalters für den Einsatz in einem vermaschten Gleichstromnetz bei. Zu diesem Zweck ist eine umfangreiche, systematische Untersuchung an Materialien verschiedener Hersteller erforderlich. Es müssen unterschiedliche Einflussfaktoren wie beispielsweise die Umgebungstemperatur, die Ladungspolarität, die Anzahl der Impulsenergieeinträge, die Energiedichte des Impulsenergieeintrags, die Steilheit und die Stromhöhe des Impulsstromes, aber auch die Höhe der angelegten Gleichspannung berücksichtigt werden. Dies dient dazu, die Einflüsse dieser Parameter auf das elektrische Verhalten (E - J -Charakteristik) der MO-Varistoren beurteilen zu können. Die Entwicklung und Realisierung eines komplexen Versuchsaufbaus ist hierfür notwendig. Dieser sollte über lange Prüfzyklen nahezu konstante Prüfbedingungen bzw. Belastungen bereitstellen und in kürzest möglicher Zeit große Anzahlen an MO-Varistoren beanspruchen. Dabei gilt es zu beachten, dass der Aufbau aufgrund der erzeugten Stromimpulse, die die Varistoren zusätzlich zu einer permanent anliegenden Gleichspannung belasten, besonders robust gegenüber elektromagnetischen Beanspruchungen (EMB) sein muss. Zudem bedarf es einer Impulsquelle, die, wie auch alle weiteren Elemente, über die der Stromimpuls fließt, mehrere 100 000 Impulse im Abstand von jeweils wenigen Sekunden standhält. Von ebensolcher Wichtigkeit ist die Ausarbeitung eines Prüfkonzepthes und des zugehörigen Auswerteverfahrens, welches die Beurteilung einer Degradation erst ermöglicht. Auf diese Weise lässt sich aus den Ergebnissen der Untersuchung eine Aussage bezüglich der Tauglichkeit heute kommerziell erhältlicher MO-Varistoren für den Einsatz in einem Gleichstromschalter treffen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass unter den gegebenen Belastungen die bereits in der Literatur ausführlich beschriebenen und in *Kapitel 2.1.3* zusammengefassten Degradationsmechanismen stattfinden. Daher ist es nicht Gegenstand dieser Arbeit, ein neues Degradationsmodell zu entwickeln, sondern vielmehr das Ausmaß der Veränderungen des elektrischen Verhaltens systematisch zu quantifizieren.

Der angestrebte Versuchsaufbau, in Kombination mit der Durchführung mehrerer charakterisierender Messungen während der Versuchsreihen, dient dazu Varistoren auf ihre Einsatzfähigkeit hin zu beurteilen und kann zusätzlich helfen eine Einstufung des Einflusses der einzelnen Parameter auf das elektrische Verhalten vorzunehmen. Letzteres könnte insbesondere für die Normung eine Rolle spielen, wenn es darum geht, möglichst effiziente Prüfungen zu entwickeln und die Betriebsmittel, in diesem Fall den MO-Varistor, innerhalb eines Worst-Case-Szenarios zu belasten. Durch die Belastungsuntersuchungen ergeben sich die Parameter, die für die Varistoren besonders kritisch sind.

4 Versuchstechnik

Das nachfolgende Kapitel gibt einen detaillierten Überblick zu der Funktionsweise der genutzten Versuchseinrichtungen. Der Hauptteil dieses Kapitels befasst sich mit einem Aufbau, der der Durchführung von Dauerversuchen dient. In diesem können MO-Varistoren durch wiederkehrende Impulsbelastungen sowie permanent anliegende Gleichspannungen belastet werden. Neben dem elektrischen Aufbau erfolgt eine Beschreibung der Prüfanforderungen. Die Darstellung dieser Versuchseinrichtung ist sehr ausführlich gehalten, da ein Aufbau in dieser Form zu diesem Zweck zuvor noch nicht beschrieben wurde. Für die Charakterisierungen kommt ein Versuchskreis zum Einsatz, der für die Untersuchung der Degradation der Charakteristik innerhalb des Leckstrombereichs mit Hilfe von Gleichspannung dient. Für die Bestimmung der Degradation im Durchbruchbereich der Kennlinie kommt ein Exponentialstoßstromkreis zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um einen Aufbau, welcher bereits am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt vorhanden und im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde. Detaillierte Angaben zu den technischen Daten der genutzten Messmittel finden sich für jeden der drei Aufbauten im Anhang. Zusätzlich erfolgt dort eine allgemeine Betrachtung der Messunsicherheit für die relevanten Prüfkreise.

4.1 Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichspannungs-Ausschaltvorgangs

Die durchgeführten Untersuchungen basieren auf der Belastung von MO-Varistoren durch eine Gleichspannung, die durch Impulsströme überlagert wird. Dies entspricht einer Belastung, wie sie während des Schaltvorgangs eines Gleichstromschalters an einem MO-Varistor auftreten kann (*Kapitel 2.2*). Diese Belastung kann synthetisch innerhalb eines Versuchskreises erzeugt werden. Verschiedene Parameter, die Stromformen und äußeren Bedingungen betreffend, sind variabel zu halten. Es ist ein Prüfkonzep^t zu definieren, anhand dessen eine systematische Beurteilung der Beeinflussung durch verschiedene Parameter auf das Material möglich ist.

4.1.1 Prüfanforderungen

Systematische Untersuchungen erfordern Versuchseinrichtungen, die die Realität möglichst präzise nachbilden und dabei ihre Prüfmodalitäten nach Bedarf anpassen lassen. Der Zweck des zu konstruierenden Dauerversuchskreises ist es, die Belastung von MO-Varistoren, wie sie während eines Ausschaltvorgangs innerhalb eines Gleichstromschalters stattfindet, nachzubilden. In *Kapitel 2.2* ist der Verlauf von Strömen und Spannungen während einer Schalthandlung eines Gleichstromschalters beispielhaft dargestellt. Der MO-Varistor erfährt hierbei eine Belastung durch einen Impulsenergieeintrag, der eine Anfangsteilheit von bis zu einigen $1\,000\text{ A}/\mu\text{s}$ aufweist (*Abbildung 2.12*). Im Anschluss an diese Impulsbelastung schließt sich unter Umständen eine Gleichspannungsbelastung an.

An einen Versuchskreis, welcher die Belastungen eines solchen Ausschaltvorgangs nachbildet, ergeben sich verschiedene Anforderungen. Allgemein ist zunächst sicherzustellen, dass sich die Belastung des untersuchten MO-Varistors ausschließlich aufgrund seiner Kennliniendegradation und nicht durch Impedanzänderungen der Versuchsanordnung selbst während der Versuchslaufzeit ergeben. Dies lässt sich durch eine weitestgehende Vermeidung von leistungselektronischen Bauelementen innerhalb des Versuchskreises realisieren, da diese beispielsweise stark durch Temperatur beeinflusst werden. In Folge dessen und insbesondere aus Platzgründen ist im Rahmen dieser Untersuchung die Implementierung eines Gleichstromschalters für die Belastung der MO-Varistoren, wie es zum Beispiel in [JN1983] realisiert wurde, als kritisch anzusehen. Stattdessen kann eine Impulsbelastung, wie sie in *Abbildung 2.12* zu sehen ist, durch einen Schwingkreis bestehend aus einer Reihenschaltung mit Kondensator, Induktivität und Widerstand angenähert werden. Dieser Impulsbelastung kann sich unmittelbar eine Gleichspannungsbelastung durch eine separate Gleichspannungsquelle anschließen. Somit ergibt sich durch die Kombination beider Belastungen ein identisches Szenario zu einem Ausschaltvorgang, wie es in *Abbildung 2.12* zu sehen ist. Die Herausforderung liegt bei diesem Aufbau in der Modellierung der Impulsform sowie dem Parallelbetrieb zweier Belastungsquellen. Letzterer erfordert eine Entkopplung der Belastungsarten voneinander. Dies ist durch den Einsatz von Schaltern und Dioden möglich. Die Impulsform ergibt sich aus der optimierten Auslegung der Impedanz (Kapazität, Induktivität und Widerstand) des Impulsstrompfades. *Abbildung 4.1* zeigt den Aufbau, auf den nachfolgend noch näher eingegangen wird.

Da sich MO-Varistoren in ihren elektrischen Eigenschaften leicht unterscheiden, unabhängig davon, dass sie aus der gleichen Produktionscharge stammen [HCH2016], ergibt sich ausschließlich durch die Untersuchung möglichst vieler MO-Varistoren ein realistisches

4.1 Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichspannungs-Ausschaltvorgangs

(statistisch abgesichertes) Abbild der auftretenden Degradation²⁴. Entsprechend ist eine Parallelbelastung einer möglichst großen Anzahl an Varistoren ein wichtiger Gesichtspunkt für die Konzeption des Prüfaufbaus. Um dennoch in angemessener Zeit und mit überschaubarem Aufwand eine umfangreiche Untersuchung durchführen zu können, ist eine Automatisierung der Anordnung sehr wichtig. Neben der Gewährleistung immer gleichbleibender Abläufe sind auf diese Weise auch Dauerversuche über mehrere Wochen möglich. Mit der Realisierung einer Automatisierung ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit einer Überwachung des Versuches. Diese soll kritische Zustände der MO-Varistoren anhand der gemessenen Strom- und Spannungsverläufe sowie der Temperatur der MO-Varistoren während des Versuches erkennen und die Versuchseinrichtung bei Bedarf sicher außer Betrieb nehmen und ertönen.

Neben den genannten grundsätzlichen Anforderungen sollte die Versuchseinrichtung weitere, spezielle Voraussetzungen erfüllen. Sie richten sich an die Beeinflussbarkeit verschiedener Prüfparameter. Erst durch die Einführung dieser zusätzlichen Freiheitsgrade ist es möglich, eine systematische Untersuchung der Einflussfaktoren durchzuführen. Die nachfolgenden Parameter sind optimaler Weise beeinflussbar zu halten:

- Höhe der Gleichspannung
- Höhe der Umgebungstemperatur
- Polarität der Belastungen
- Höhe des Impulsstromes
- Höhe des Stromanstieges der Impulsbelastung
- Höhe des Energieeintrags durch die Impulsbelastung

Obige Aufzählung enthält sechs Punkte, von denen drei unabhängig von den jeweils anderen beeinflussbar sind. Hierbei handelt es sich zum einen um die Höhe der Gleichspannung, welche sich bei Nutzung einer separaten Quelle beliebig wählen lässt. Zum anderen ist es mittels eines Ofens, in dem sich die Varistoren während der Belastung befinden, möglich, die Umgebungstemperatur und damit die Betriebstemperatur der Varistoren zu beeinflussen. Der dritte einzeln beeinflussbare Punkt stellt die Polarität der Belastungen dar. Hiermit ist die Stromrichtung durch den MO-Varistor gemeint, welche sich durch die Drehung des Varistors innerhalb der Prüflingsaufnahme, die für die Kontaktierung und Fixierung der

²⁴ Es handelt sich hierbei nicht um unterschiedliche Mechanismen, sondern vielmehr um verschiedene Ausprägungen des gleichen Mechanismus, die zu starken Streuungen in den Ergebnissen führen können.

MO-Varistoren innerhalb der Öfen sorgt, ändern lässt (*Abbildung 4.4*). Anders verhält es sich bei den drei Parametern, die sich auf die Impulsbelastung beziehen. Diese drei Parameter beeinflussen sich stets gegenseitig und sind zudem abhängig von der Kennlinie des Varistoren. Dieser Umstand führt auch dazu, dass es nicht möglich ist, jeden MO-Varistor mit einem exakt identischen Impulsstrom zu beaufschlagen. Die Impulse sollten dennoch von Varistor zu Varistor möglichst geringfügige Abweichungen aufweisen. Das bedeutet für die Versuchseinrichtung, dass die Impulsstrompfade impedanzgleich sein müssen. Auf diese Weise kommt eine Abweichung der Impulsformen zwischen den MO-Varistoren ausschließlich aufgrund der leicht variierenden Kennlinien, sprich Materialeigenschaften, der Varistoren selbst zustande.

4.1.2 Funktionsweise des Versuchskreises

Mit den vorab definierten Anforderungen und ersten Lösungsansätzen ist die Konstruktion eines Versuchskreises möglich, wie er in *Abbildung 4.1* in einem vereinfachten Ersatzschaltbild zu sehen ist. Das Ersatzschaltbild zeigt die Realisierung des Impulsstromkreises (links oben) sowie den Anschluss einer permanenten Gleichspannungsquelle (links unten) an zwei der drei vorhandenen, vereinfacht dargestellten Umluft-Öfen (rechts unten in rot angedeutet). Die Darstellung der Anschlüsse der Varistoren innerhalb der Öfen erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels (*Abbildung 4.2*). Der Impulskreis besteht in erster Linie aus einem Kondensator von $75\text{ }\mu\text{F}$, den eine externe Spannungsquelle permanent auf bis zu 10 kV lädt. Durch das Schließen des Hauptschalters S_H entlädt sich der Kondensator über einen in Reihe liegenden Widerstand von $5\text{ }\Omega$ auf einen MO-Varistor. Die für den gewünschten Stromverlauf notwendige Induktivität von $0,6\text{ }\mu\text{H}$ wird vollständig durch die verlegten Kabelwege innerhalb des Impulsstrompfades abgedeckt. Da die Stromanstiegszeit möglichst wenig gedämpft werden soll, ist es notwendig, auf einen möglichst niederinduktiven Aufbau zu achten. Zum Teil werden zur Verringerung der Leitungsinduktivität Kupfergeflechtbänder genutzt.

Zusätzlich werden die die Varistoren in den Öfen kontaktierenden zu- und abführenden Kabel miteinander verdreht. Um mehrere Varistoren gleichzeitig prüfen zu können, dafür aber keine zusätzliche Leistung installieren zu müssen, wird der Impulsstrom nacheinander mit Hilfe der Sekundärschalter $S_{\text{aux1-12}}$ auf die einzelnen MO-Varistoren geschaltet. Die Sekundärschalter bzw. deren Steuerung stellen die Entladung in lediglich einen der vier in einem Ofen vorhandenen MO-Varistoren sowie einen gleichbleibenden Belastungszyklus sicher. Die Erläuterungen zu der genauen Abfolge der Belastungen sowie der Steuerung

4.1 Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichspannungs-Ausschaltvorgangs

des Kreises mittels einer SPS erfolgt im Anhang.

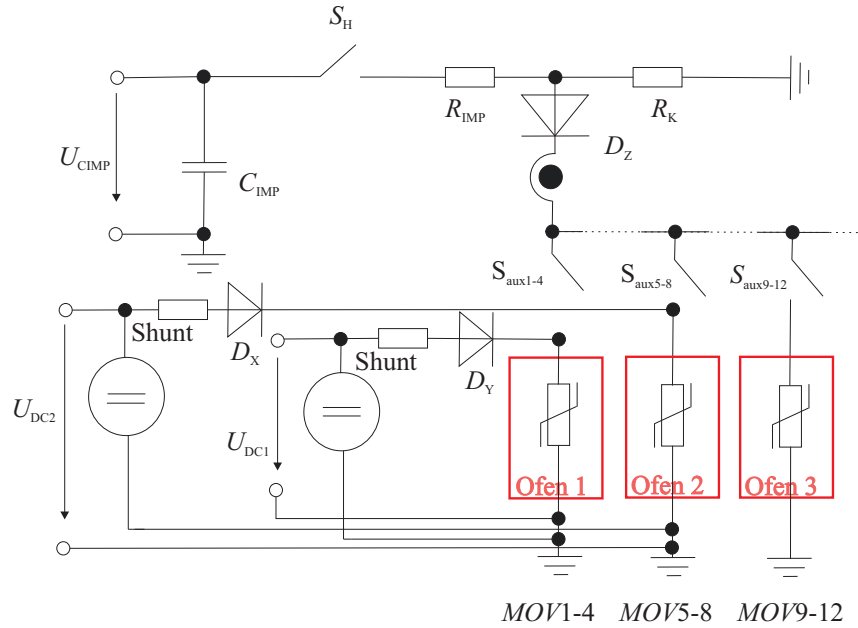


Abbildung 4.1: Ersatzschaltbild des Dauerversuchsstands; schematische Darstellung der MO-Varistoren in den drei Öfen. Mit U_{CIMP} : Ladespannung Impulskondensator, C_{IMP} : Impulskondensator, S_H : Hauptschalter, R_{IMP} : Dämpfungswiderstand im Impulspfad, R_K : Kommutierungswiderstand, $U_{DC1,2}$: Permanente Gleichspannungsquelle, $S_{aux1-4,5-8,9-12}$: Hilfsschalter, $D_{x,y,z}$: Dioden

Das Ersatzschaltbild in *Abbildung 4.2* zeigt detailliert die in *Abbildung 4.1* für die drei Öfen vereinfacht dargestellten Gegebenheiten. In dieser Darstellung ist deutlicher zu sehen, dass die Varistoren jeweils über einen Sekundärschalter optional in den Impulsstrompfad geschaltet werden können. An dem dargestellten Ofen ist zudem eine Gleichspannungsquelle angeschlossen, die die Varistoren permanent mit einer Spannung von bis zu 3 kV belasten kann. Dies ist für zwei der drei im Kreis enthaltenen Öfen in dieser Form realisiert. So ist es möglich, während eines Versuchsdurchlaufes zwei verschiedene Gleichspannungen an je vier Varistoren innerhalb des Aufbaus zu untersuchen, *Abbildung 4.1*. Eine Versorgungsunterbrechung eines MO-Varistors hiervon findet ausschließlich dann statt, wenn eine Impulsbelastung in diesen Varistor eingetragen wird. In diesem Fall sperrt die im Gleichstrompfad enthaltene Diode D_{xi} bzw. D_{yi} den Stromfluss der Gleichspannungsquelle. Gleichzeitig sorgt sie dafür, dass der Impulsstrom nicht in die Gleichspannungsquelle fließen und diese zerstören kann. Eine weitere Diode D_z in Reihe zu dem Hauptschalter (*Abbildung 4.1*) sorgt dafür, dass sich der Strom aus der Gleichspannungsquelle nicht vollständig

über den parallel zu den MO-Varistoren angeschlossenen Widerstand (R_k in *Abbildung 4.1*) fließt. Der Parallelwiderstand dient dazu, den Stromfluss erst während des Rückens der Impulsbelastung zu übernehmen, sobald der Widerstandswert des belasteten MO-Varistors (violett in *Abbildung 4.3*) über den des Parallelwiderstandes ansteigt, (*Abbildung 4.3* rot markiert). Somit ist sichergestellt, dass der Stromfluss durch den Varistor zu einem definierten Zeitpunkt endet. Auch kürzere Schaltzeiten des Hauptschalters könnten diesen Effekt erzielen. Sie sind jedoch in einer Zeit kleiner 1 s, aufgrund der Realisierung des Schalters als pneumatischem Schalter, nicht möglich.

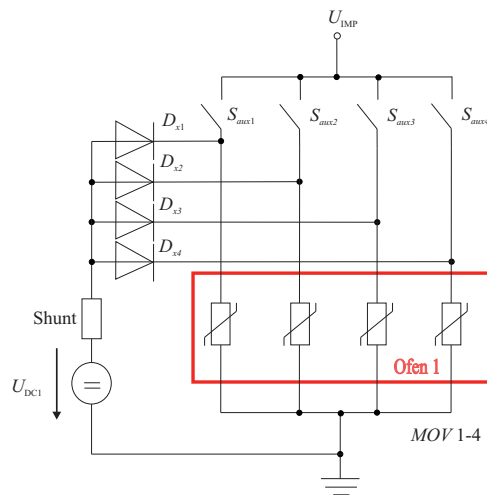


Abbildung 4.2: Ersatzschaltbild der Innenansicht eines Ofens mit vier MO-Varistoren. Mit U_{DC1} : permanente Gleichspannungsversorgung, $S_{aux1,2,3,4}$: Hilfsschalter 1-4, $D_{x1,2,3,4}$: Dioden, U_{IMP} : Zuleitung Impulsbelastung, $MOV1-4$: MO-Varistoren 1 bis 4 in einem Ofen.

Der Verlauf einer Impulsbelastung, wie sie innerhalb der realisierten Versuchseinrichtung entsteht, ist *Abbildung 4.3* zu entnehmen. Orange dargestellt ist die Spannung, gelb der Stromverlauf unter Beeinflussung des Kommutierungswiderstandes R_k über der Zeit, mit einem Energieinhalt von 780 J. Die Anfangsteilheit beträgt hier 1 kA/ μ s, die Gesamtdauer beträgt etwa 0,4 ms. Zusätzlich sind zum Vergleich ein Strom- (grau) und Spannungsverlauf (blau) enthalten, welche den Impulsverlauf durch den MO-Varistor bei Einsparung des vorab erwähnten Kommutierungswiderstandes zeigt. Dieser weist einen Energieinhalt von 1120 J auf. Violett dargestellt ist die Veränderung des ohmschen Widerstandes des MO-Varistors zu sehen. Rot markiert ist der Zeitpunkt, zu dem der Widerstand von Varistor und Kommutierungswiderstand einander entsprechen. Es ist deutlich zu sehen, dass sich der Verlauf der Spannung stark verändert und ebenso dass sich der Stromfluss leicht reduziert, sobald der ohmsche Widerstand des Varistors oberhalb dem des Kommutierungswider-

4.1 Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichspannungs-Ausschaltvorgangs

standes liegt. Somit fließt der Strom im Rücken des Stromimpulses in Höhe von etwa 70 A nicht über den MO-Varistor, sondern über den Kommutierungswiderstand, und der Impuls durch den MO-Varistor wird von 1,1 ms auf eine Gesamtdauer von etwa 0,4 ms verkürzt. Der Kondensator entlädt sich schnell über den Widerstand, wodurch sich das schnelle Absinken der Spannung erklärt. Auch die Amplituden reduzieren sich durch den Einfluss des Kommutierungswiderstandes. Auffällig ist der ausgeprägte, schnell abfallende Peak zu Beginn des Spannungsimpulses. Dieser lässt sich durch die Ansammlungen der Ladungsträger oder deren Bindung in Störstellen innerhalb des MO-Varistormaterials erklären [Eda 1979].

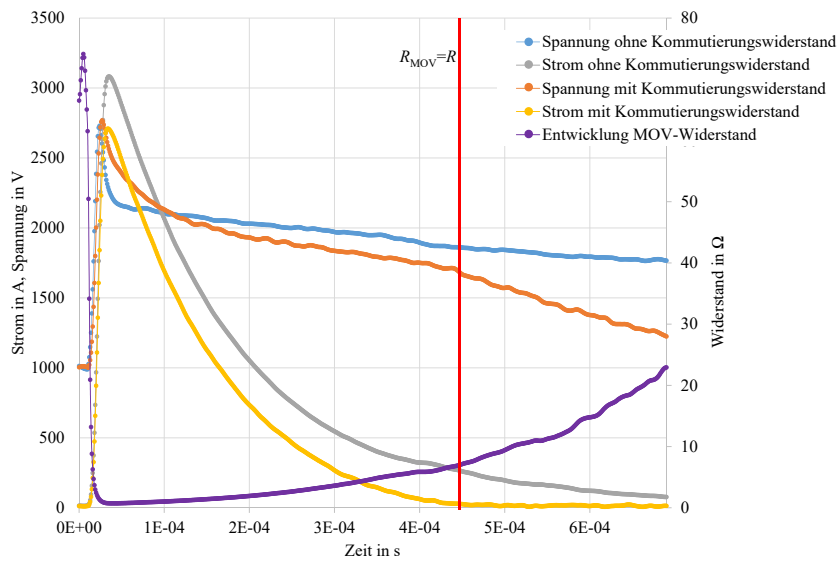


Abbildung 4.3: Verlauf einer Impulsbelastung in dem realisierten Dauerversuchskreis; blau: Spannung ohne Parallelwiderstand, grau: Strom ohne Parallelwiderstand, orange: Spannung mit Parallelwiderstand, gelb: Strom mit Parallelwiderstand und violett: Entwicklung des ohmschen Widerstandes des MO-Varistors

Bislang sind die zu erwartenden Belastungsverläufe der MO-Varistoren unter realen Bedingungen nicht bekannt. Aus Simulationen des Schaltverlaufes sowie Tests von Prototypen finden sich verschiedene Werte in der Literatur zu den Strom- und Spannungsverläufen. So werden für die Stromsteilheit oft auch geringere Werte angegeben [HBH2019]. In [Hei2017] werden mit Hilfe eines Schalterprototypens Werte zwischen 0,4 kA/μs bis hin zu 2,5 kA/μs

erzeugt. Es ist bekannt, dass sich die Stromsteilheit der Impulse auf die Degradation stärker auswirkt als die Impulsdauer [Tuc2015], daher erhielt eine möglichst große Stromsteilheit hohe Priorität. Eine Ergänzung hierzu erfolgte im weiteren Verlauf der Versuchsreihen durch die Erhöhung des Energieeintrags während des Impulses von anfänglich 25 % (dem Verlauf in *Abbildung 4.3* entsprechend) auf später bis zu 100 % der Nennenergie.

Grundsätzlich können MO-Varistoren in Form der bei der Produktion entstehenden Blöcke (*Abbildung 2.1*) geprüft werden, da sich die erzielten Ergebnisse im Normalfall auf eine beliebige Höhe und auch Reihenschaltung der Varistoren skalieren lassen. Diese Tatsache spart Platz und insbesondere Kosten ein, da mit wesentlich kleineren Spannungen gearbeitet werden kann. Bedingt hierdurch können innerhalb eines Ofens mehrere Varistoren geprüft werden, wie es in *Abbildung 4.2* innerhalb des Ersatzschaltbildes und *Abbildung 4.4* in dem Foto des Ofeninnenraumes zu sehen ist. Die Varistorblöcke werden zwischen zwei Aluminiumelektroden platziert, die für eine ausreichende Kontaktierung sorgen. Die obere Elektrode weist zu diesem Zweck ein Gewicht von 2 kg auf. Die Elektroden setzen sich aus jeweils drei Elementen zusammen. Zunächst bestehen sie aus einem massiven Aluminiumblock, welcher neben der Anpresskraft auch eine optimalere Wärmeabgabe gewährleistet. Unter dem Aluminiumblock liegt eine Aluminiumscheibe, die eine Höhe von etwa 5 mm und einen Durchmesser aufweist, der jeweils 1-2 mm geringer ist als der des Varistors selbst. Die Ränder dieser Scheibe sind mit Radien versehen, welche dazu dienen, dass es nicht zu Teilentladungen an scharfen Kanten kommt. Zusätzlich befinden sich sog. Rillenscheiben (ebenfalls aus Aluminium gefertigt und dünner als 1 mm) zwischen dem Varistor und letztgenannter Scheibe. Sie verfügt über eine gleichmäßig konzentrisch gerillt Oberfläche und dient dazu, die Oberflächenrauigkeit der Metallisierung möglichst gut auszugleichen. Durch ihre Abmessungen (ihr Umfang entspricht weitestgehend der Metallisierung der Varistoren) sorgen sie für eine teilentladungsfreie Kontaktierung des MO-Varistors sowie eine Vergleichmäßigung der Stromverteilung auf der Oberfläche und vermeiden so punktuelle Schädigungen der Kontaktflächen, welche zu Ausfällen führen können. In der erdseitigen Aluminiumscheibe ist eine Bohrung eingebracht (*Abbildung 4.4* unten), in der ein Temperatursensor²⁵ platziert werden kann. Aufgrund der geringen Abmessungen der zu prüfenden MO-Varistorblöcke und der damit verbundenen geringen Betriebsspannungen sind eine Gleichspannungsquelle, die 3 kV erzeugen kann, sowie eine maximale Ladeeinrichtung des Impulskondensators von 10 kV ausreichend. Die Messung der Gleichspannung erfolgt über einen ohmschen Spannungsteiler mit einem Teilverhältnis von 1 zu 498. Die Gleichstrommessung erfolgt als Messung des Summenstromes aller vier in einem Ofen angeschlossenen MO-Varistoren über einen Shunt auf der Hochspannungsseite. Diese un-

²⁵ FISO Technology inc. Glasfasersensor

4.1 Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichspannungs-Ausschaltvorgangs

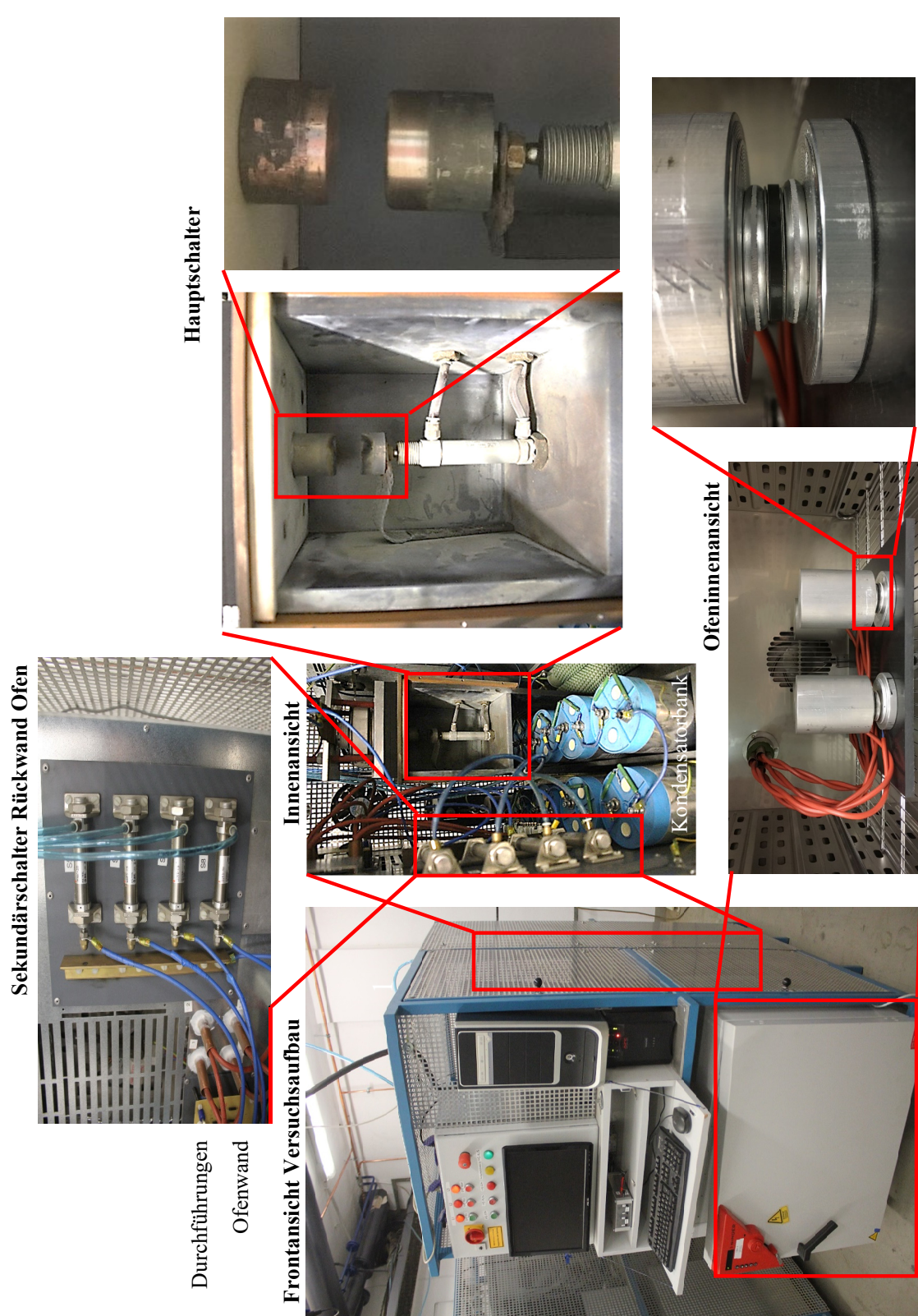


Abbildung 4.4: Links: Frontansicht Versuchseinrichtung, mittig: Innenansicht mit Sekundärschaltern (oben im Detail), Hauptschalter und Kondensatorbank, rechts: Detailansicht des Hauptschalters, unten: Detailansicht Ofeninneres mit den Varistoren zwischen den Elektroden.

übliche Vorgehensweise liegt darin begründet, dass andernfalls aufgrund der überlagerten Impulsbelastung Einkopplungen in die Messeinrichtungen zu erwarten sind, welche für eine Ausgangsspannung an der Messeinrichtung sorgen, die die auswertende Computerhardware nicht isolieren kann und zu ihrer Zerstörung führt. Für die Auswertung der Messergebnisse kommt die Software LabView²⁶ zum Einsatz. Zusätzlich nimmt ein Tastkopf der Firma Testec (PHV4002-3-RO) die Impulsspannung und ein Rogowskiwandler (Power Electronics Measurements CWT150) den Impulsstrom auf und leiten die Daten über ein Oszilloskop (Tektronix TDS3034) an den PC und hier wiederum für die Überwachung des Versuches an die Software LabView weiter. Die erhobenen Messergebnisse dieses Versuchskreises dienen lediglich der Überwachung und können aufgrund ihres Umfangs nicht permanent aufgezeichnet werden. Zu den technischen Daten der Soft- und Hardwarekomponenten, die für die Auswertung der Messergebnisse dienen finden sich detaillierte Angaben im Anhang. Um eine Vorstellung des tatsächlichen Aussehens der Anordnung zu haben, zeigt *Abbildung 4.4* eine Auswahl an Fotos des Versuchskreises und einiger implementierter Komponenten. Links im Bild ist die Frontansicht auf die Versuchseinrichtung zu sehen. Neben einem von drei Öfen, im unteren Bereich, ist auch ein Schaltschrank, welcher die Sicherheitstechnik beinhaltet, und ein PC zu sehen. Letzterer dient, wie bereits erwähnt, der Überwachung des Versuchs. Die Messwerte aus dem laufenden Versuch werden hier permanent ausgelesen und führen bei einer Überschreitung von Grenzwerten bei Temperatur und Höhe des Gleichstromes zu einer Unterbrechung der Belastungen und Erdung der Kondensatorbank. In der Rückansicht wären lediglich zwei weitere Öfen zu sehen. Innerhalb jedes Ofens befinden sich die MO-Varistoren zwischen den Aluminiumelektroden. Die Ofeninnenansicht ist im unteren Bereich der Abbildung dargestellt. Auf sie wurde vorab bereits genauer eingegangen. Die Zu- und Ableitungen zu den Varistoren sind mit Hilfe von Durchführungen durch die Ofenrückwand verlegt und mit hitzebeständigen Kabeln ausgeführt. Zwischen den Elementen der Vorderseite und den beiden rückwärtigen Öfen ergibt sich im Inneren des Sicherheitsbereichs ein Zwischenraum, der für den notwendigen elektrischen Aufbau genutzt wird. An den Ofenrückwänden sind in unmittelbarer Nähe zu den Durchführungen die Sekundärschalter montiert. Die oberste Darstellung zeigt dies noch einmal im Detail. Die Schalter werden pneumatisch betrieben und mit Hilfe einer Siemens SPS nacheinander angesteuert. In einer vorherigen Version des Versuchsaufbaus kamen Relais zum Einsatz. Diese hielten den wiederholten Impulsstrombelastungen auf Dauer nicht Stand. Jeder Varistor wird alle 156 Sekunden mit einem Impuls beaufschlagt. Täglich erfolgen 6 645 Impulse, die über den im Hintergrund der Innenraumdarstellung erkennbaren Hauptschalter, der den Stromimpuls auf den Varistor zuschaltet, fließen. Hier

²⁶ LabVIEW ist eine Systementwicklungssoftware für Prüf- und Regelanwendungen der Firma National Instruments.

wird während jedes Impulses ein Lichtbogen gezündet, weshalb die Elektroden besonders stark beansprucht werden. Trotz des Einsatzes von Kupfer-Wolfram-Elektroden muss nach einer Betriebszeit von jeweils drei Tagen eine Aufarbeitung stattfinden. Nach dieser Versuchsdauer sind die Oberflächen der Elektroden stark verrußt, wie es im Vollbild des Schalters zu sehen ist, und zeigen erhebliche Strommarken. Insbesondere die Rußschicht verändert den Übergangswiderstand und damit auch den Stromimpuls. Zudem erhitzt sich der Schalter aufgrund des wiederholten Impulsstromflusses von einigen Kilo-Ampere stark. Das Material ermüdet hierdurch zunehmend. Das führt unter Umständen zu unvorhergesehenen Unterbrechungen, da es der Belastung mitunter nicht mehr Stand hält. Der Hauptschalter muss daher während des Versuches permanent gewartet werden. Dies ist bei den Sekundärschaltern nicht der Fall, da sie stromlos schalten. Zusätzlich koppelt der zündende Lichtbogen zwischen den Elektroden stark in die aufgenommenen Messsignale ein und verfälscht diese, oder führt zu einer Störung der verwendeten Software, was in beiden Fällen zu einer Unterbrechung des Versuches führt. Je nach Einkopplung kann schlimmsten Falls die Zerstörung des Rechners erfolgen. Auch weitere im Raum befindliche Versuchsaufbauten können erheblich in Mitleidenschaft gezogen werden. Daher ist die EMB einzudämmen. Der EMB wirkt eine Kapselung des Hauptschalters durch einen Eisenmantel entgegen. In *Abbildung 4.4* ist dies im rechten Bereich zu erkennen. Hier ist eine Mantelfläche der Kapselung abmontiert, wie es für Wartungsarbeiten gemacht wurde, um beispielsweise die Elektroden ohne einen Ausbau des gesamten Schalters warten zu können. Auch der Hauptschalter wird pneumatisch betrieben. Der Versuchsaufbau muss Messreihen mit bis zu 360 000 Impulsen während eines Dauerversuches stand halten. Hierbei entladen sich die Kondensatoren, auf der Ofeninnenansicht im unteren Bereich zu erkennen, jedes Mal vollständig und werden innerhalb von zehn Sekunden wieder aufgeladen. Dieser Belastung halten auch die Kondensatoren der Kondensatorbank nicht unbegrenzt stand. Ein Ausfall eines Kondensators führt neben der Unterbrechung des Dauerversuches, meist auch zu einer Beschädigung benachbarter Bauteile. In einem zweiten Aufbau kam daher ein einzelner Kondensator zum Einsatz, der speziell für diese hohen Anzahlen an Impulsentladungen gefertigt wurde.

4.2 Anordnung zur Bestimmung der Gleichspannungscharakteristik

In *Abbildung B.2* im Anhang ist das Ersatzschaltbild des Prüfkreises dargestellt, welcher für die Bestimmung der mit Gleichspannung gemessenen Charakteristik im Leckstrombereich der in der Dauerversuchseinrichtung belasteten MO-Varistoren dient. Die Details zu den

technischen Daten der verwendeten Quellen und Messmittel finden sich ebenfalls im Anhang (*Anhang B*). Der Aufbau setzt sich aus einer Gleichspannungsquelle der Firma fug (HCN 140-6500) sowie einem Pico-Ampere-Meter der Firma Keithley (6484) zusammen. Der MO-Varistor wird innerhalb eines Umluftofens der Firma Binder in einer Prüflingsaufnahme verschraubt.

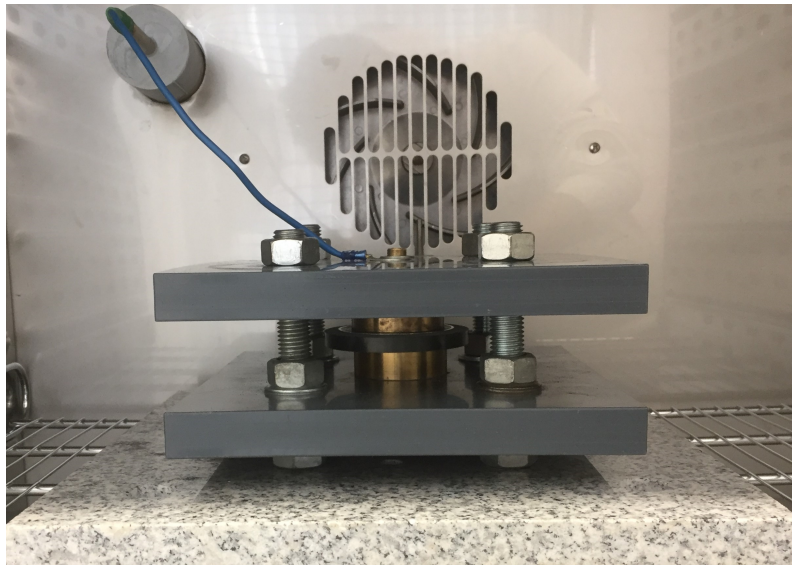


Abbildung 4.5: Foto der Prüflingsaufnahme zur Fixierung der MO-Varistoren in der Versuchsanordnung zur Messung der Charakteristik im unteren Bereich bei Gleichspannung.

Da die Kennlinie in diesem Strombereich stark temperaturabhängig ist [Eda1978b, KM1978, BCM1996], kann eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse nur in dem Fall gewährleistet werden, dass die Temperaturen der Varistoren bei jeder Messung möglichst gleich sind. Aus diesem Grund kühlen die Varistoren, die aus dem Dauerversuch kommen, zunächst auf Raumtemperatur ab, bevor sie in einem separaten handelsüblichen Umluftofen auf 30 °C aufgeheizt werden. Bei dieser Temperatur erfolgt eine Fixierung in der Anordnung innerhalb des Ofens der Versuchseinrichtung, welcher ebenfalls auf 30 °C aufgeheizt ist. Der Varistor wird zwischen zwei Messingelektroden, deren Durchmesser an den der zu vermessenden Prüflinge anpassbar ist, platziert. Auch hier dienen Aluminiumrillenscheiben der besseren Kontaktierung. Mit Hilfe von vier Gewindestangen und entsprechenden Muttern, die zwei PVC-Platten werden die Varistoren fixiert. Schwankungen in der Anpresskraft sind mit dieser Anordnung nicht zu vermeiden, innerhalb des betrachteten Kennlinienbereiches bei den von Hand erzeugten Drücken allerdings als unkritisch anzusehen [WB1976]. Dies bestätigt sich auch in den Kontrollmessungen, die im Vorlauf zu jeder Zwischenmessung mit einem unbelasteten Kalibriervaristor durchgeführt wurden.

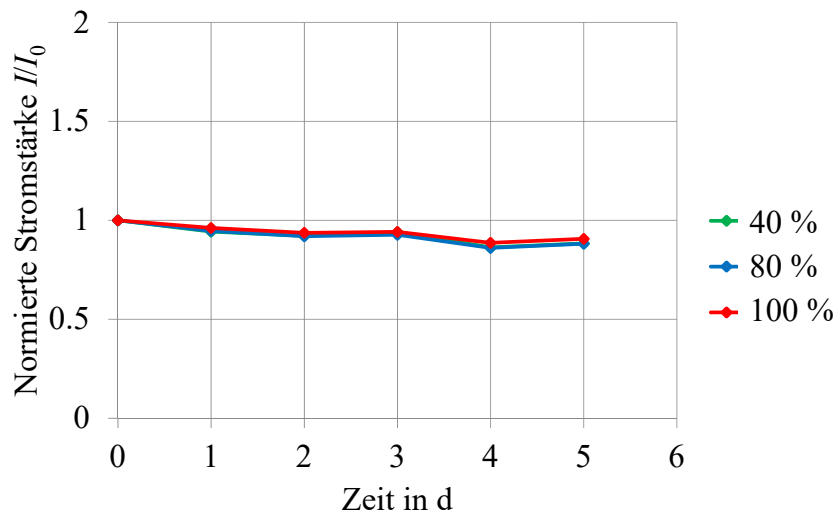


Abbildung 4.6: Veränderung des Stromes bei konstanter Spannung im Leckstrombereich, gemessen an einem unbelasteten Kalibriervaristor im Vorlauf zu jeder Zwischenmessung. Der Strom ist auf das Messergebnis bei der ersten Messung normiert. Grün: bei 40 %, blau: bei 80 % und rot: bei 100 % der Referenzspannung aufgenommen. Genaue Erläuterungen zur Darstellungsform erfolgen in *Kapitel 5.3*.

Das Ergebnis einer solchen Messung ist in *Abbildung 4.6* zu sehen. Die Abbildung weist in den drei betrachteten Spannungsbereichen eine leichte Absenkung im Strom auf. Diese liegt allerdings in einem Bereich, der bei den belasteten MO-Varistoren weit überschritten wird, *Abbildung 5.6*. Die hier sichtbaren Absenkungen sind auf den allgemein bekannten Formierungsvorgang der MO-Varistoren zurück zu führen. Sie werden nicht durch die Messtechnik selbst verursacht. Durch die Messung selbst ist der verwendete Varistor genau genommen nicht mehr unbelastet. Die Bestimmung der Messunsicherheit, die dieser Kreis aufweist, erfolgt in *Kapitel 4.4*.

Ebenfalls essentiell für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse ist die Einhaltung eines gleichbleibenden Messablaufs. Um keinerlei Abweichungen im Ablauf zuzulassen, kommt neben dem bereits einzuhaltenden Abkühl- und Aufheizvorgängen nach der Versuchsunterbrechung auch in dieser Versuchsanordnung LabView zum Einsatz. Die Software steuert den Kreis mit den notwendigen Messabläufen und archiviert die Ergebnisse. Wie bereits in *Kapitel 2.1.3* dargestellt, kommt es bei Anlegen einer Gleichspannung an einen MO-Varistor zu einer Stromamplitude, die innerhalb von Sekunden abklingt und erst nach langen Zeiträumen stabil ist. Um nach Anlegen einer Spannung nicht mitunter Tage warten zu müssen, um einen Messwert erfassen zu können, findet die Aufnahme des zugehörigen Stromwertes zu einem genau definierten Zeitpunkt statt. Diese Zeitspanne umfasst hier

10 s in Anlehnung an Methodiken, wie sie auch einzelne Hersteller praktizieren. Aufgrund dieser kurzen Wartezeit, bis zur Messwertaufnahme kommt es zu der in *Abbildung 2.2* zu sehenden und in *Kapitel 2.1.2* erwähnten Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Ströme bei Wechsel- und Gleichspannungen. Die Begründung hierfür wurde bereits in *Kapitel 2.1.2* geliefert.

Je nach Charakteristik des verwendeten Materials entstehen nacheinander zwischen 10 und 15 Messpunkte verteilt über einen Strombereich von 400 pA bis 10 mA. Die Ergebnisse der aufeinander folgenden Messungen sind unmittelbar miteinander vergleichbar und zeigen die Veränderung der Kennlinie im Leckstrombereich mit zunehmender Anzahl an Impulsbelastungen, (*Kapitel 5.3*).

4.3 Doppel exponentialstoßstromkreis zur Bestimmung der Impulscharakteristik

Der Doppel exponentialstoßstromkreis dient im Rahmen dieser Arbeit dazu, mit Hilfe von Impulsströmen der Form 8/20 μ s und 30/60 μ s den Durchbruchbereich der Kennlinie der MO-Varistoren zu charakterisieren. Detaillierte Auflistungen der technischen Daten von Messeinrichtungen sowie ein Ersatzschaltbild des Kreises finden sich in *Anhang B*.

Der grundsätzliche Aufbau ähnelt dem des Impulskreises innerhalb des in *Kapitel 4.1.2* beschriebenen Kreises für die Erzeugung der Impulsströme der Dauerversuchseinrichtung. *Abbildung 4.7* zeigt beispielhaft die Impulsverläufe für einen 8/20 μ s-Impuls. Die Spannung ist in rot, der Strom in blau über der Zeit aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Spannung ihr Maximum vor dem Strom erreicht, wie es bei MO-Varistoren typisch ist. Neben der Vermutung, dass die Temperaturabhängigkeit der E - J -Charakteristik [Tuc2014] für diese Verschiebung verantwortlich ist, muss an dieser Stelle beachtet werden, dass sich bei der Belastung mit hohen Spannungen aufgrund des Leitungsmechanismus ein induktives Verhalten des MO-Varistors ausbildet. Dieses beruht nicht auf der Bauhöhe der Varistoren, sondern einzig auf der Trägheit der Ladungsträger innerhalb des Materials [MW1987]. Es kann daher nicht nach dem gängigen Verfahren von [Rei2008] und [Tuc2014] kompensiert werden.

Tabelle 5.2 gibt eine Übersicht zu den innerhalb der durchgeführten Untersuchungen aufgenommenen Messwerten im Exponentialstoßkreis wieder. Die Messungen bei 30/60 μ s erfolgten, um einen detaillierteren Eindruck von den Veränderungen im Durchbruchbereich zu erhalten, führten allerdings im Nachhinein zu keinem nennenswerten Erkenntnisgewinn und werden daher in der Ergebnisdarstellung im *Kapitel 5.3* nicht weiter aufgeführt.

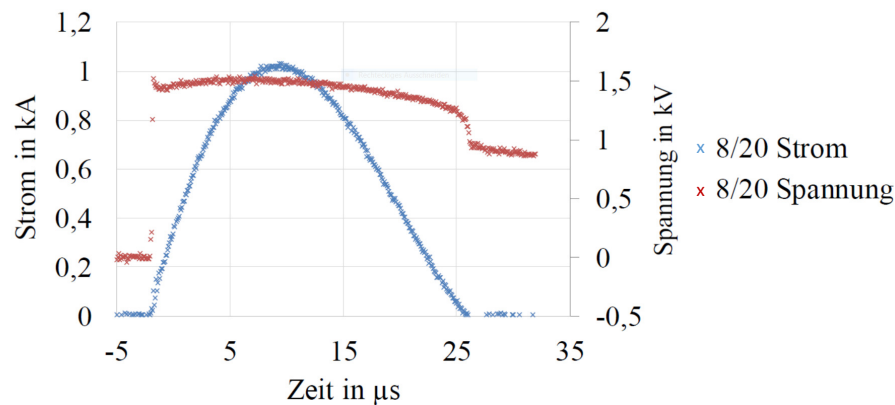


Abbildung 4.7: Beispielhafter Verlauf des Impulsstromes (blau) und der Spannung (rot) mit einem 8/20 µs-Impuls erzeugt im Doppexponentialstoßstromkreis.

Tabelle 4.1: Übersicht zu den im Exponentialstoßkreis aufgenommenen Messwerten

Stromform in µs	100 A	200 A	500 A	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA
30/60	x	x	x	x	x	0	0
8/20	0	0	0	x	x	x	x

4.4 Abschätzung der Messunsicherheiten

Aufgrund von äußeren Beeinflussungen sowie der Fehleranfälligkeit von Messeinrichtungen und Messverfahren ist eine fehlerfreie Messung einer Größe nicht möglich. Es ergeben sich immer Abweichungen vom wahren Wert dieser Größe, welche durch die Messunsicherheit mit der eine jeweilige Messung behaftet ist ausgedrückt wird. Die Messunsicherheit ist daher ein notwendiger Parameter, um ein Messergebnis richtig bewerten und einordnen zu können. Die Messabweichung ist im Allgemeinen zunächst nicht als Messfehler zu sehen, da es sich um akzeptierte Ungenauigkeiten und nicht um fehlerhafte Bedienung einer bzw. um defekte Messeinrichtungen handelt. Die hier durchgeführten Berechnungen sind an [IEC60060-2; DIN1319-3] sowie [Mue2017] angelehnt und dienen der genaueren Bestimmung der Messunsicherheiten in den verschiedenen Messeinrichtungen der Versuchseinheiten für die Bestimmung der Degradation der MO-Varistoren. Sie werden im Anhang detailliert hergeleitet. Dieses Kapitel dient der Abschätzung der Messunsicherheiten der Messeinrichtungen, des Aufbaus, der zur Bestimmung der E - J -Charakteristik im Durchbruchbereich (*Kapitel 4.3*) dient, sowie des Aufbaus, der für die Bestimmung im unteren Gleichstrombereich (*Kapitel 4.2*) zum Einsatz kommt. Die Herleitung der Gleichungen, die zu der

Berechnung der jeweiligen Messunsicherheiten herangezogen wurden, sind im Anhang zu finden. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Versuchseinrichtung, die dem Eintrag der Belastungen in die MO-Varistoren dient, ebenfalls Messeinrichtungen enthält, die Messunsicherheiten aufweisen. Die Messergebnisse dieses Kreises dienen jedoch lediglich der Sicherstellung eines korrekten Ablaufes der Dauerbelastung und haben für die Auswertung etwaiger Degradation der verwendeten MO-Varistoren keine Relevanz. Somit sind die unweigerlich vorhandenen Messunsicherheiten dieser Messeinrichtungen für die hier präsentierten Ergebnisse von zweitrangigem Interesse und an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt²⁷.

Betrachtungen für den Kreis zur Bestimmung der Charakteristik im unteren Gleichstrombereich

In diesem Versuchsaufbau sind die relevanten Messgrößen unmittelbar von den eingebauten Messgeräten abzulesen und für die Evaluation nutzbar. Es ist keine Umrechnung aus anderen gemessenen Größen notwendig. Dies führt zu einer unkomplizierteren Berechnung der Messunsicherheit ohne Fehlerfortpflanzung. Zum Einsatz kommt ein Pico-Ampere-Meter der Firma Keithley (Model Nr. 6485) mit einer Messunsicherheit von maximal $\pm 0,4\%$, sowie eine Spannungsquelle der Firma fug (Modell Nr. HCN 140-6500) mit einer Unsicherheit von $\pm 1,15\%$. Für beide Instrumente sind detaillierte technische Angaben in *Anhang B* enthalten. Die Messergebnisse übernimmt der PC mittels eines Multifunktionsmoduls der Firma National Instruments (PCI 6221), welches über eine Auflösung von 16 Bit verfügt. Das bedeutet eine Auflösung von 153 nA pro Punkt. Daher sind die Messwerte des Stromes im Nano-Ampere-Bereich mit wesentlich höheren Unsicherheiten ($\pm 1,9\%$) belastet als diejenigen im Milli-Ampere-Bereich ($\pm 0,4\%$). Für die Auswertung werden deshalb Werte im Mikro- und Milli-Ampere-Bereich gewählt. Für die Spannung ergibt sich eine Auflösung von 1 V pro Punkt. Damit sind die Ergebnisse für die Spannung mit einer Messunsicherheit von maximal $\pm 2,15\%$ behaftet.

Betrachtungen für den Exponentialstoßstromkreis

Der Exponentialstoßstromkreis ist nicht dafür ausgelegt, einen exakten Stromwert für den Impuls festzulegen. Stattdessen sind die Ladespannung der Kondensatoren und die Schlagweite der Funkenstrecke wählbar. Auf diese Weise ist es nahezu unmöglich, einen gewünsch-

²⁷ Die von den Herstellern und durch eigene Kalibrierung ermittelten Unsicherheiten der einzelnen Messgeräte, die innerhalb dieser Versuchseinrichtung zum Einsatz kommen, sind in den jeweiligen Tabellen, die die technischen Daten der Messgeräte zusammenfassen, im Anhang enthalten.

ten Stromwert zu erzielen. Da als Referenz für die Veränderung der E - J -Charakteristik der Spannungswert, der sich bei einem $8/20\text{ }\mu\text{s}$ -Impuls und einer Amplitude von 10 kA einstellt, dient, findet für dessen Ermittlung eine lineare Approximation aus zwei gemessenen Werten statt. Hierfür ergibt sich die im *Anhang A* aufgeführte Gleichung. Aus den in *Tabelle A.1* im *Anhang A* aufgeführten Angaben ergibt sich durch Einsetzen in *Gleichung A.2* in *Anhang A* die Gesamtunsicherheit s_y des berechneten Spannungswertes für einen $8/20\text{ }\mu\text{s}$ -Impuls bei 10 kA zu $10,72\text{ V}$ (entspricht etwa $0,5\%$) bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 5% .

4.5 Prüfkonzzept

Die Intention der Untersuchung ist es, die Tauglichkeit von kommerziell erhältlichen MO-Varistor-Materialien für den Einsatz in Gleichstromschaltern zu prüfen. Zudem dient sie der Identifikation der Parameter, die potentiell eine starke Veränderung der elektrischen Charakteristik eines MO-Varistors verursachen. Zu diesem Zweck finden Dauerversuche statt, die die Varistoren mit Belastungen beaufschlagen, die denen in einem Gleichstromschalter nachempfunden sind. In *Kapitel 4.1.2* findet eine ausführliche Beschreibung der zu diesem Zweck konstruierten Versuchseinrichtung statt. Zusätzlich sind die variabel gehaltenen Belastungsparameter aufgelistet. Innerhalb jedes einzelnen Versuchsdurchlaufs können bis zu drei Parameter variiert werden, die Impulsspannung für alle zwölf enthaltenen MO-Varistoren bleibt dabei identisch.

Der grundsätzliche Ablauf eines Dauerversuchs verändert sich nicht und ist in *Abbildung 4.8* dargestellt. Änderungen der E - J -Charakteristik bestimmen sich immer in Relation zu einem initialen Zustand. Entsprechend finden Eingangsmessungen, in diesem Fall Messungen der Gleichstromcharakteristik im Leckstrombereich, sowie im Durchbruchbereich mittels $8/20\text{ }\mu\text{s}$ - und $30/60\text{ }\mu\text{s}$ -Impulsen statt, bevor es zu anderweitigen Belastungen kommt. Alle Messungen erfolgen zwei Mal, wobei zunächst eine Messung stattfindet, deren Stromrichtung dem Stromfluss während der Belastung im Dauerversuch entspricht ("forward"). Die darauf folgende, zweite Messung findet mit einem Strom statt, der der Belastungsrichtung während des Dauerversuches entgegengesetzt ist ("reversed"). Die hierzu relevanten Versuchseinrichtungen sowie ihre Funktion sind in *Kapitel 4.2* und *4.3* beschrieben. Im Anschluss startet der Dauerversuch. Um die Veränderungen der Charakteristik zu dokumentieren, finden in zu Beginn kürzeren, im Verlauf des Versuchs immer länger werdenden Intervallen Unterbrechungen des Versuches statt. Während dieser Unterbrechungen erfolgen Messungen der Charakteristik im niedrigen Gleichstrombereich.

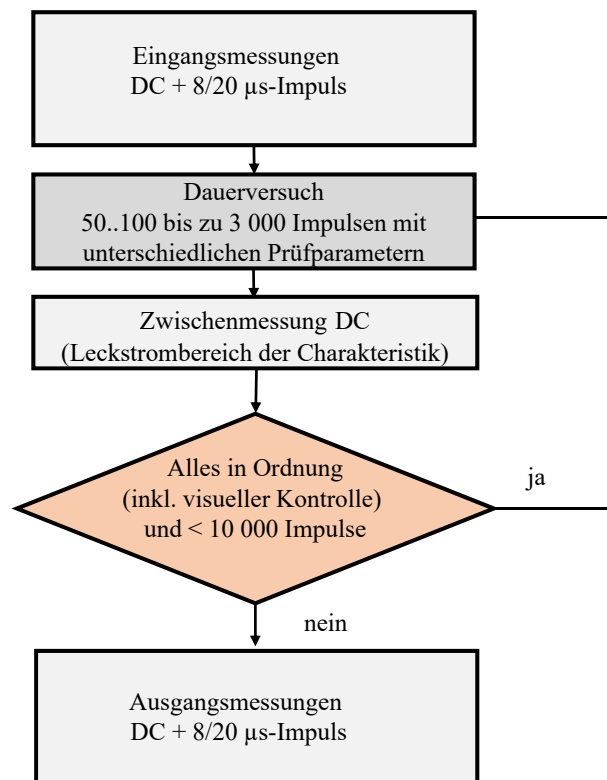


Abbildung 4.8: Verlaufsdiagramm für die Durchführung eines Dauerversuchs zur Bestimmung der Kennlinienveränderungen aufgrund der innerhalb eines Dauerversuchs eingetragenen Belastungen

Von einer Messung im Durchbruchbereich der Kennlinie wird aus zwei Gründen abgesehen. Zum einen sind weitaus größere Änderungen im Leckstrombereich zu erwarten [KM1978], dies bestätigen die durchgeführten Untersuchungen (*Abbildung 5.3.4*). Zum anderen sind die Aufnahmen der Kennlinienpunkte im Durchbruchbereich sehr zeitintensiv. Letzteres würde nahezu eine Verdopplung der Versuchsdauer bedeuten. Die Prüfintervalle orientieren sich an der Anzahl der in die Varistoren eingetragenen Impulse.

Zu Beginn des Versuches sind die Intervalle kürzer, da sich mit den ersten Impulsenergieeinträgen ebenso wie zu Beginn der Gleichspannungsbelastung die größten Veränderungen ergeben, [Chr2001]. Auch dieser Aspekt bestätigte sich im Verlauf der durchgeführten Untersuchungen, (*Kapitel 5.3.4*). Hier erfolgt die Bestimmung der Gleichstromcharakteristik bereits nach einzelnen Impulsenergieeinträgen. Aus Gründen der Praktikabilität finden erste Unterbrechungen in den standardisierten Versuchsreihen nach 50 bis 100 Impulsbelastungen pro MO-Varistor statt. Dieses Intervall steigert sich während des Verlaufs des Dauerversuches bis hin zu 3 000 Impulsbelastungen pro Varistor. Jede Unterbrechung dient auch einer

visuellen Begutachtung der MO-Varistoren, die sicherstellt, dass die Kontaktoberfläche der Varistoren möglichst frei von Strommarken ist. Diese können aufgrund einer ungleichmäßigen Kontaktierung der ZnO-Oberfläche durch die aufmetallisierte Elektrode entstehen und im Laufe des Versuchs zu Ausfällen führen, die nicht in einer starken Veränderung der Materialcharakteristik begründet sind. Eine detaillierte Erläuterung sowie Bilder hierzu finden sich in *Kapitel 5*. Der Versuch endet regulär, nachdem mindestens 10 000 Impulsbelastungen in jeden der MO-Varistoren eingetragen wurden. Nur für einzelne Dauerversuche fand eine größere Anzahl von Impulsen statt, bis zu 40 000 Impulsen pro Varistor, um eine unerwartete Materialermüdung nach mehr als 10 000 Impulsen ausschließen zu können. Abschließend erfolgte eine Ausgangsmessung, die die gleichen Untersuchungen beinhaltet, wie sie für die Eingangsmessung beschrieben wurden. Für die Beurteilung der Tauglichkeit der MO-Varistoren bei Belastungen durch den Betrieb innerhalb eines Gleichstromschalters kann sich derzeit an IEC-Norm 60099-4 orientiert werden. Sie berücksichtigt Betriebsbedingungen für MO-Varistoren, die in Wechselspannungsnetzen eingesetzt werden.

Im Durchbruchbereich, insbesondere bei einem $8/20\ \mu\text{s}$ -Impulsstrom mit einer Stromamplitude von $10\ \text{kA}$, gibt sie eine maximal zulässige Änderung der Spannung von $\pm 5\%$ an. Erfolgt eine Überschreitung dieses Wertes innerhalb der Prüfungen, gelten die Varistoren als nicht geeignet für den Einsatz, da sich der Schutzpegel zu stark geändert hat. Dieser Grenzwert soll auch hier zunächst für die Beurteilung als Referenzwert dienen. Für eine Einschätzung im Leckstrombereich sieht die Norm den Test für die Bestimmung des wiederholten Ladungstransfers vor (Q_{rs} -Test).

Im Rahmen dessen werden zehn MO-Varistoren mit jeweils zwanzig rechteckförmigen Strömen oder mit Strömen in Form einer Sinus-Halbwellen belastet. Hierbei erfolgt die Einbringung einer durch die Norm vorgegebenen Ladungsmenge. Der Versuch gilt als bestanden, wenn kein mechanischer Ausfall an einem der zehn MO-Varistoren festzustellen ist, sich Referenz- und Restspannung um weniger als $\pm 5\%$ ändern und die Varistoren einem Stromimpuls der Form $8/20\ \mu\text{s}$ in Höhe von $0,5\ \text{A}/\text{cm}^2$ oder dem doppelten Wert des Nennableitstoßstromes²⁸ standhalten. Entsprechend existiert auch im Leckstrombereich ein Grenzwert der Referenzspannungsänderung von maximal $\pm 5\%$. Eine Änderung in diesem Kennlinienbereich bedeutet bei dem Einsatz des Varistors in einem Wechselspannungsnetz dauerhaft veränderte Verluste, insbesondere ein Absinken der Referenzspannung ist daher als kritisch anzusehen. Die Änderung des Stromes im Leckstrombereich ist in den meisten Gleichstromschalterkonzepten unproblematisch, da die Varistoren im Normalbetrieb nicht dauerhaft an Spannung liegen. Somit ist die thermische Stabilität nicht gefährdet. Hier existiert eine Ausnahme, siehe in [WM2015]. Die Auswertung der Referenzspannungsänderung ist daher aber von eher untergeordnetem Interesse.

²⁸ Der geringere Amplitudenwert ist zu wählen.

5 Belastung von MO-Varistoren mit Impuls- und Gleichspannungen

Zu Beginn dieses Kapitels erfolgt eine Übersicht über die verwendeten MO-Varistoren, die von verschiedenen Herstellern stammen, sowie der daran durchgeführten Untersuchungen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, können im Rahmen dieser Arbeit die Ergebnisse nicht bis ins Detail abgebildet werden. Daher erfolgt die Darstellung in Form einer Übersicht der Veränderungen, die sich im Anschluss an die Versuche eingestellt haben. Eine Ausnahme bildet hier die anfängliche Erläuterung der Auswertemethodik sowie die Darlegung einiger “Detail“-Untersuchungen zum Ende des Kapitels. Hauptbestandteil dieses Kapitels bildet die Betrachtung einzelner Parameter, die innerhalb der Versuchsreihen für die Varistoren unterschiedlicher Hersteller variiert wurden. Abschließend ergibt sich aus diesem Kapitel die Beurteilung des verwendeten Materials bezüglich seines Einsatzes innerhalb eines Gleichstromschalters. Hierfür findet ein Abgleich mit dem Richtwert der Degradation im Durchbruchbereich (bei einem Stromimpuls einer Amplitude von 10 kA) und im Leckstrombereich (bei Referenzspannung) von je $\pm 5\%$ aus der IEC-Norm 60099-4 für den Einsatz von MO-Varistoren in Wechselspannungsnetzen [IEC60099-4] statt. Eine Änderung im Leckstrombereich ist innerhalb einer üblichen Schalterkonstellation (mit einem dem Gleichstromschalter vorgelagerten Trennschalter) unkritisch, da sie nicht zu erhöhten Verlusten und einer Gefährdung der thermischen Stabilität [GHG2017] während des Betriebs führt. Zudem ist es möglich, notwendige Prüfungen abzuleiten, denen Varistoren zukünftig zu unterziehen sind, um deren Tauglichkeit eingehender beurteilen zu können.

5.1 Verwendete MO-Varistoren und Versuchsübersicht

Die verwendeten MO-Varistoren sind fabrikneu. Die sieben verschiedenen Fabrikate sind fortlaufend nummeriert und stammen von fünf Herstellern. Fabrikneu bedeutet, dass neben den üblichen Stückprüfungen²⁹ vorab keine weiteren Belastungen eingetragen wurden.

²⁹ Jeder neu produzierte MO-Varistor erfährt Belastungen, die der Ermittlung seiner elektrischen Kenndaten wie z. B. Rest- und Referenzspannung dienen.

Einerseits aus Gründen der Verfügbarkeit, andererseits auch aufgrund der Erhöhung der Energiedichte der Impulseinträge während des Dauerversuches, setzt sich die Gesamtheit der untersuchten Varistoren aus solchen unterschiedlicher Abmessungen zusammen. Alle 228 geprüften Varistoren haben eine zylindrische Form. Sie lassen sich anhand des Durchmessers in zwei Größen unterteilen. Neben einem kleineren, der im Bereich zwischen 38 mm bis 47 mm (Größe a: 11,3 ... 17,3 cm²) liegt, lässt sich eine weitere Größe mit einem Durchmesser zwischen 60 mm und 75 mm (Größe b: 28 ... 44 cm²) definieren. Zudem variieren die Höhen in einem Bereich zwischen 2,9 mm und 7,2 mm³⁰. Sie sind teils mit gängigem Material, aber bezüglich ihrer Abmessungen speziell für den Einsatz innerhalb dieser Untersuchung gefertigt, teils aus bestehenden Produktportfolios entnommen³¹. Die Varistoren sollen explizit handelsübliche Varistoren sein, weshalb die Hersteller, mit einer Ausnahme, nicht in die Untersuchung mit einbezogen und die Varistoren am freien Markt beschafft wurden.

Tabelle 5.1: Übersicht der innerhalb der durchgeführten Versuchsreihen berücksichtigten Varistortypen der unterschiedlichen Hersteller

Fabrikat	Hersteller	geprüfte Anzahl	Gleichspannungsstabil	Größe	Kontaktierungsprobleme	E_b in V/mm	E_p in V/mm	Energieaufnahmevermögen
1	A	144	ja	a und b	Ausnahmen	175	315	4 kJ/(kV/mm)(0,8 E_b)
2	B	36	ja	a und b	ja	214	395	1150 J LD 2 ms
3	C	6	nein	a	nein	86,5	176	unbekannt
4	D	6	unbekannt	a	nein	87	186	unbekannt
5	A	12	nein	a	nein	210	425	unbekannt
6	A	12	nein	a	nein	229	420	4 kJ/(kV/mm)(0,8 E_b)
7	E	12	ja	a und b	ja	170	285	2300 J LD 2 ms

Nur ein Fabrikat (Nr. 5) wurde in sehr geringer Stückzahl explizit für die in dieser Arbeit geprüfte Anwendung hergestellt. Die *Tabelle 5.1* zeigt eine Übersicht zu den verwendeten Herstellern und Varistoren. Neben den Abmessungen sind auch Angaben zu den elektri-

³⁰ Aus Gründen der Anonymisierung können keine konkreteren Angaben zu den Bemaßungen gemacht werden.

³¹ Letztere haben einen größeren Anteil an den untersuchten Typen.

schen Eigenschaften gegeben. Hierbei entspricht E_b der Feldstärke, die bei anliegender Referenzspannung entsteht, und E_p der Feldstärke bei einer Belastung mit einem 10 kA 8/20 μ s-Impuls. Für das Energieaufnahmevermögen gibt es unterschiedliche Angaben, wie *Tabelle 5.1* zu entnehmen ist. Hierbei steht das Kürzel LD für einen Rechteckimpuls, der innerhalb von 2 ms die angegebene Energie in den Varistor einbringt.

Untersuchungen, die mit Prüflingen von Fabrikat 7 erfolgten, finden sich in den aufgeführten Ergebnissen in *Kapitel 5.3* nicht wieder, da es aufgrund der im weiteren Verlauf dieses Kapitels geschilderten Kontaktierungsproblematik zu wiederkehrenden Ausfällen der Varistoren und damit verbunden der gesamten Versuchstechnik kam. Verschiedene Optimierungsversuche der Kontaktierung schlugen hier, im Gegensatz zu Fabrikat 2, fehl.

Tabelle 5.2 zeigt die Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit mit den aufgeführten Varistoren durchgeführt wurden. Neben der Bezeichnung des Versuchsdurchgangs sind die Kenndaten zu den eingestellten Parametern gegeben. Außerdem kann der letzten Spalte das jeweilige Fabrikat entnommen werden. Mit Hilfe dieser Auflistung ergibt sich eine Übersicht bezüglich miteinander in Relation setzbarer Versuchsdurchgänge. Es fällt auf, dass es in manchen Versuchsreihen nicht zu einer Impulszahl von bis zu 10 000 Impulsen gekommen ist, wie es eingangs gefordert wird. Dies liegt in den Versuchen D und H darin begründet, dass die angegebene Parameterkonstellation oder Kontaktierungsprobleme, *Kapitel 4.5*, wie bereits erwähnt, wiederholt zu MO-Varistorausfällen geführt haben. Letzteres wird im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels noch einmal detailliert aufgegriffen. Im Fall der Versuche N und P waren bereits nach einer geringen Anzahl an Impulsbelastungen keine weiteren bzw. ausschließlich geringfügige Degradationen zu erwarten. Letzteres kann aufgrund vorangegangener Versuche postuliert werden. Neben Durchgängen mit niedrigerer Impulsanzahl liegen auch drei mit größeren Anzahlen vor. Die Versuche B, C und E liegen mit bis zu 35 000 Impulsbelastungen pro Varistor weit über den regulär als Ende des Versuches festgelegten 10 000 Impulsen. Diese Überschreitungen dienen der Sicherstellung, dass es nach einem Eintrag von 10 000 Impulsen nicht zu unerwarteten Veränderungen oder sogar Ausfällen kommt. Einer der interessantesten Parameter, der innerhalb der Untersuchung betrachtet wurde, ist die Energiedichte der Stromimpulse. Dies kann aus den Arbeiten von [Tuc2014] und [Rei2008] geschlussfolgert werden, in denen die Energiedichte eingehend untersucht wird. Sie zeigen, dass Stromsteilheit und Impulsform einen deutlichen Einfluss besitzen. Die Variation der Energiedichte hat zur Folge, dass die Werte für Stromamplitude und Stromsteilheit schwanken. Auch die Energiedichte selbst unterliegt leichten Schwankungen. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache begründet, dass die Ladequelle des Impulskondensators nicht kontinuierlich, sondern in Spannungsstufen von 500 V auf eine Ladespannung eingestellt werden kann. In Kombination mit leicht

Tabelle 5.2: Übersicht der durchgeführten Dauerversuche mit einer Auflistung der variierten Versuchsparameter

Versuch	T in °C	\hat{i} in kA	$d\hat{i}/dt$ in A/ μ s	W' in J/cm ³	U_{DC} in % von U_b	Anzahl Impulse	Fabrikat	Anzahl MOV
A ¹	30; 60; 80; 100; 115	3	1 000	27,5	80	10 000	1	12
B	60; 115; 150	2,8	750	56	80	35 000	1	12
C	115	2,9	1 060	58,4	0; 80; 96	16 000	1	12
D	60; 115; 150	3	720	23	80	3 000	7	12
E1	60; 115	6,8	820	95	80	24 600	1	4
E2	115	-	-	-	80	24 600	1	4
F1	115	4,7	1 000	53	80	10 000	4	4
F2	115	5,1	1 300	61	80	10 000	3	4
F3	115	-	-	-	80	10 000	3; 4	4
G1 ²	115	6,1	1 200	71	40	10 000	1	4
G2	115	6,5	1 100	71	60	10 000	1	4
G3	115	6,9	850	93	0	10 000	1	4
H	60; 115	7,2; 8	1 000	211	0; 80	<1 000	1	12
I	60; 115	4,2	600	99	0; 74	10 000	6	12
J	60; 115	4	600	91	0; 80	10 000	5	12
K	60; 115	3,7	850	55	0; 100	10 000	2	12
L	115	3,5	850	55	40; 80	10 000	2	12
M ³	115	5,8	780	60	0; 60; 80	2 500	1	12
N	60; 115	4,5	700	110	0; 80	16 000	1	12
O	115	7	1 600	210	0; 80	10 000	1	8
P	60; 115	n.b.	n.b.	98	0; 80	1 500	1	12

¹ Versuchsreihe mit MOVs größeren Durchmessers als in den nachfolgenden Versuchen.

² Versuchsreihe mit einer Variation der permanenten Gleichspannungsbelastung bei erhöhter Energiedichte. Das Ergebnis kann nicht ohne weiteres in die in dieser Arbeit aufgeführten Darstellungen integriert werden.

³ Versuchsreihe zur Verifikation der Funktionsfähigkeit des Versuchskreises nach längerer Betriebspause.

variierenden MO-Varistor-Charakteristika führt dies zu unterschiedlichen Werten. Somit ergeben sich für die Untersuchungen Werte von 55 J/cm^3 bis 60 J/cm^3 oder 90 J/cm^3 bis 110 J/cm^3 . Zusätzlich fand eine Messreihe bei 210 J/cm^3 statt. Diese Werte begründen sich dadurch, dass es bei einer Nennenergiedichte von üblicher Weise 200 J/cm^3 und einer hohen Impulszahl sinnvoll ist, mit geringen Werten wie 25 % der Nennenergie zu starten und sich dann zu steigern. Die Parameter Stromamplitude und Stromanstieg sind stark von der Impedanz im Strompfad und somit von den Varistoren selbst abhängig. Hier wurde das Ziel verfolgt, mit den vorhandenen Möglichkeiten möglichst hohe Werte zu erreichen. Die Wahl der Temperatur ergibt sich aus der Norm [IEC60099-9] und wird in *Kapitel 5.3.1* genauer erläutert.

Die Tabelle zeigt, dass der realisierte Prüfkreis weit über zwei Millionen Impulse erzeugt hat. Das unterstreicht noch einmal die Notwendigkeit der Robustheit der Versuchstechnik.

Wie bereits erwähnt, führten manche Dauerversuche zu mehrfachen Ausfällen von MO-Varistoren. Der Versuch D mit Varistoren des Fabrikates 7, welche zum Versuchszeitpunkt aus dem aktuellen Produktsortiment stammen und der Größe b entsprechen, endete nach 3 000 Impulsen. Die Varistoren zeigen bereits nach den Eingangsmessungen zur Bestimmung der E - J -Charakteristik im Durchbruchbereich deutliche Strommarken auf der Metallisierung. Der Eintrag weniger Stromimpulse im Rahmen des Dauerversuches führt bereits zu einer deutlichen Beschädigung der Metallisierung *Abbildung 5.1*. Deutlich sind Abbrandspuren zu erkennen. An diesen Stellen hat der Strom Einschmelzungen in Metallisierung und ZnO-Material verursacht. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die Metallisierung dieser MO-Varistoren vermutlich, im Gegensatz zu denen der Fabrikate 1, 3, 4, 5 und 6, nicht aufgespritzt, sondern aufgedruckt ist. Dieses Verfahren birgt die Gefahr von kleinen Lufteinschlüssen zwischen der nicht vollkommen ebenen Oberfläche des ZnO-Materials und der aufgedruckten Aluminiumschicht. Sie sorgen für eine ungleichmäßige Stromverteilung durch den MO-Varistor. Bei vielen vorhandenen Lufteinschlüssen kann so eine Konzentration des Stromes auf einige wenige Strompfade stattfinden. Hierdurch treten erhöhte thermische Spannungen in der Keramik auf, die im Extremfall zum Ausfall des Varistors führen können. Ein Stromfluss über wenige Strompfade birgt zudem das Risiko, dass die an die Strompfade angrenzende Lufteinschlüsse sehr stark erhitzt werden. Dies führt zu einer Erhöhung des Druckes innerhalb des Einschlusses und je nach Temperaturanstieg zum Aufbrechen der Metallisierung an den entsprechenden Stellen. Außerdem zeigen einfache Simulationen zum Feldstärkeverlauf eine Erhöhung innerhalb der Lufteinschlüsse, welche zu Teilentladungen im eingeschlossenen Volumen führen und ebenfalls die Metallisierung beschädigen könnten.



Abbildung 5.1: Beschädigungen der Metallisierung auf MO-Varistoren des Fabrikates 7 nach Eintrag weniger hundert Stromimpulse im Rahmen des Dauerversuchs D.

In beiden Fällen entstehen scharfe Kanten und Unebenheiten in der Kontaktoberfläche, die zu einem Luftspalt zwischen Varistor und Elektrode führen können. Infolgedessen ist mit Teilentladungen zu rechnen, die dauerhaft eine Schädigung der Keramik und im Anschluss einen Ausfall verursachen. Die Ursache für die Ausfälle der Varistoren aus diesem Fabrikat kann somit nicht auf das Material selbst zurückgeführt werden, sondern ist vielmehr eine Folge der für eine Belastung mit Impulsströmen offenbar als problematischen anzusehenden Variante, die für die Aufbringung des Kontaktmaterials auf den MO-Varistor-Rohling genutzt wird.

Ähnlich verhält es sich bei MO-Varistoren von Fabrikat 2. Ein Unterschied ermöglicht es hier, die Kontaktierung zu optimieren. Dieser besteht darin, dass die Kontaktschicht bei diesen Varistoren bis an den Rand bündig zu der Glasmantelfläche geführt ist, während bei Fabrikat 7 ein nicht mit Kontaktmaterial versehener Ring entlang des äußeren Randes bis hin zum Mantel besteht. Somit ist das ZnO-Material aus Fabrikat 2 vollständig geschützt, und es war möglich, in einem Lötswallbad eine zusätzliche Elektrode auf die vorhandene Kontaktierungsschicht zu löten. Diese Maßnahme ermöglichte Untersuchungen mit niedrigen Energiedichten von 55 J/cm^3 . Versuche bei höheren Energiedichten blieben weiterhin problematisch. Die Varistoren der Hersteller A und D sind nicht frei von kleinen Strommarken geblieben. Sie traten in der Regel aber erst im Verlauf der Dauerbelastungen auf und behielten ein weit geringeres Ausmaß, ohne eine sichtbare Vertiefung innerhalb

der Kontaktoberfläche zu verursachen. Eine Ausnahme in Versuch P mit Material von Hersteller A bei einer Energiedichte von 210 J/cm^3 , bei dem es zu Verschmelzungen zwischen MO-Varistor und Aluminiumrillenscheibe kam, trat auf. Hier führte eine Unterbrechung zu Messzwecken zum Abreißen der Rillenscheibe vom Varistor, und dies verursachte ein größeres Loch in der Metallisierung, wodurch es im weiteren Verlauf des Versuches ebenfalls zu einem Ausfall des entsprechenden Varistors kam. Auch in diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Beschädigung der Kontaktfläche ursächlich für den Ausfall des Varistors war. Das bestätigt die vorangegangene Vermutung, dass das Verfahren für die Aufbringung der Kontaktierungsschicht besondere Aufmerksamkeit gelten muss.

5.2 Vorgehensweise zur Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

Aufgrund des Umfangs der erhobenen Daten aus den Versuchsreihen, die in *Tabelle 5.2* aufgeführt sind, ist es notwendig, eine zusammenfassende Darstellungsform zu wählen. Diese soll die Beurteilung der Veränderung der E - J -Charakteristik sowie einen Vergleich verschiedener MO-Varistoren, die unter gleichen Bedingungen geprüft wurden, ermöglichen. Aus jeder Charge wurden, um Abweichungen zu berücksichtigen, mehrere MO-Varistoren untersucht. Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen jeweils den Mittelwert dieser Untersuchungen. Auf eine detaillierte Darstellung jedes einzelnen Verlaufes der Veränderungen über die gesamten Messbereiche muss aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet werden. Um dennoch das Verständnis für die auftretenden Veränderungen zu fördern, gibt dieses Kapitel zunächst mit den nachfolgenden Abbildungen einen Überblick zu den typischer Weise auftretenden Veränderungen und deren Entwicklung während der Dauerversuche. Die Darstellungen sowie die abgebildeten Veränderungen der Charakteristiken werden erläutert und führen zu ersten Schlussfolgerungen bezüglich der Nutzbarkeit der MO-Varistoren in Gleichstromschaltern. Diese ausführliche Darstellung zu Beginn ist für das Verständnis der im Anschluss innerhalb des *Kapitels 5.3* dargestellten zusammenfassenden Abbildungen wichtig. Die vorgestellten Parameterstudien beinhalten eine Betrachtung der Einflüsse der Umgebungstemperatur, der angelegten permanenten Gleichspannung sowie der während des Stromimpulses eingetragenen Energiedichte.

Grundsätzlich ist die Art der Änderung in der E - J -Charakteristik meist sehr ähnlich, die Ausprägung unterscheidet sich jedoch zum Teil erheblich. Diese Unterschiede können selbst bei Varistoren auftreten, die einer identischen Belastung ausgesetzt wurden und aus einer identischen Produktionsserie stammen [HCH2016].

Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft die Änderung der E - J -Charakteristik einer “forward“ durchgeführten Messung für einen MO-Varistor, der vom Hersteller als gleichstromstabil deklariert ist. Im Leckstrombereich, gemessen mit Gleichspannung, sind die Messwerte für vier verschiedene Degradationsstadien dargestellt, beginnend mit (blau) der Eingangsmessung ohne vorhergehende Belastung durch den Dauerversuchsstand³². Zusätzlich zu der Ausgangsmessung nach mehr als 10 000 Impulsen (rot) sind die Messergebnisse aus den Zwischenmessungen nach 100 (grün) und 5 800 (orange) Impulsen eingefügt. Die Ergebnisse aus den Messungen im Leckstrombereich sind mithilfe von Rauten, während die ebenfalls dargestellten Ergebnisse aus der Eingangs- (blau) und Ausgangsmessung (rot) mittels 8/20 μ s-Impulsströmen durch Kreuze gekennzeichnet sind. Dabei zeigt die Abzisse die logarithmisch skalierte Stromdichte³³ durch den MO-Varistor und die Ordinate die anliegende Feldstärke. Es zeigt sich der bekannte Verlauf der E - J -Charakteristik, welcher sich im Verlauf des Dauerversuches und damit ansteigender Anzahl an Impulsbelastungen bzw. Belastungsdauer mit permanent anliegender Gleichspannung verändert. Insbesondere im Leckstrombereich zeigt sich eine Degradation der Charakteristik. Sie bewirkt zunächst einen Rückgang des fließenden Stromes bei gleicher Spannung (nach 100 Impulsen), führt nach weiter andauernder Belastung allerdings zu einem Anstieg des Stromflusses im unteren und zu einer Umkehr hin zu einer Abnahme im oberen gemessenen Leckstrombereich. Dies führt zu einer Drehung der Kennlinie im Bereich kleiner Ströme (Abbildung 5.2), was mit einer Erhöhung der Steigung einhergeht. Dabei ergibt sich für den Spannungsbereich, in dem die Varistoren betrieben werden, eine eher geringe Änderung. Er liegt im Bereich des Drehpunktes der Charakteristik. Die Darstellungen für den Leckstrombereich zeigen immer die Veränderungen des Stromes bei einer festen Spannung. In den meisten Schalterkonzepten, in denen der Varistor im Normalbetrieb nicht an Spannung liegt, stellt dies allerdings kein Problem dar.

Im Unterschied zu den Ergebnissen in [JN1983] zeigt sich im Durchbruchbereich der E - J -Charakteristik nur eine geringe Änderung, welche unterhalb des Wertes von $\pm 5\%$ als Richtwert liegt. Der Unterschied in den Ergebnissen lässt sich vermutlich damit erklären, dass es sich bei den in dieser Arbeit untersuchten MO-Varistoren um ein gegenüber 1983 optimiertes Material handelt. Die Belastungen führen im Durchbruchbereich der Kennlinie zu einer Erhöhung der Spannung bei gleichbleibendem Strom.

³² Jeder hier geprüfte Varistor ist bereits durch die Hersteller für die Bestimmung der Rest- und z. T. Referenzspannung einzelnen Belastungen ausgesetzt worden. Dies beeinflusst die Charakteristik im Allgemeinen nur unwesentlich.

³³ Sie wird ausschließlich aus der resistiven Komponente des Stromes ermittelt, der zusätzlich einen kapazitiven Anteil besitzt.

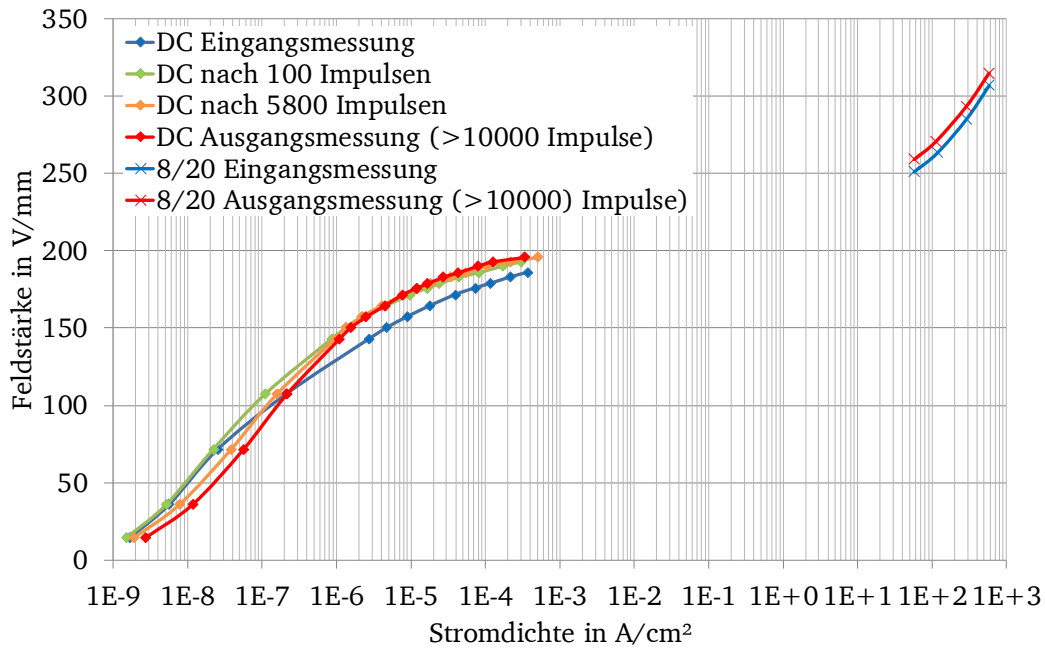


Abbildung 5.2: Veränderung der E - J -Charakteristik im Verlauf des Dauerversuches für eine “forward“ gerichtete Messung eines einzelnen als gleichstromstabil deklarierten MO-Varistors. Im unteren Gleichstrombereich sind die Messwerte vor Versuchsbeginn (blau mit Rauten), nach 100 (grün), 5 800 (orange) und nach >10 000 (rot mit Rauten) Impulsen gekennzeichnet. Im Durchbruchbereich sind die Werte vor (blau mit Kreuzen) und nach (rot mit Kreuzen) dem Dauerversuch dargestellt.

Dies führt zu einem Anstieg des Schutzpegels und ist daher grundsätzlich kritisch zu beurteilen, wie bereits in *Kapitel 2.1.2* näher erläutert wird. Die hier auftretenden Änderungen liegen unterhalb von 5 % und sind somit akzeptabel. In [Cig2013, Tuc2014] und [Cig2017] wird ebenfalls von einer zum Teil starken Veränderung der “charakteristischen“ Spannung (ähnlich der Referenzspannung) bei Belastung mit steilen Impulsströmen der Form $4/10 \mu\text{s}$ berichtet. Während der gleichen Untersuchung wurde die Restspannung nicht nennenswert beeinflusst.

Neben einer offensichtlich sehr hohen Sensitivität des Leckstrombereichs auf die durchgeführten Belastungen, sowie der hier stattfindenden Drehung der Kennlinie, deutet diese Beobachtung zusätzlich darauf hin, dass anfänglich eingebrachte Belastungen stärkere Auswirkungen bezüglich der Degradation haben, als es nachfolgende vermögen. Dieser Punkt wird in [Tuc2014] bestätigt und im Verlauf dieses Kapitels erneut und detailliert aufgegriffen.

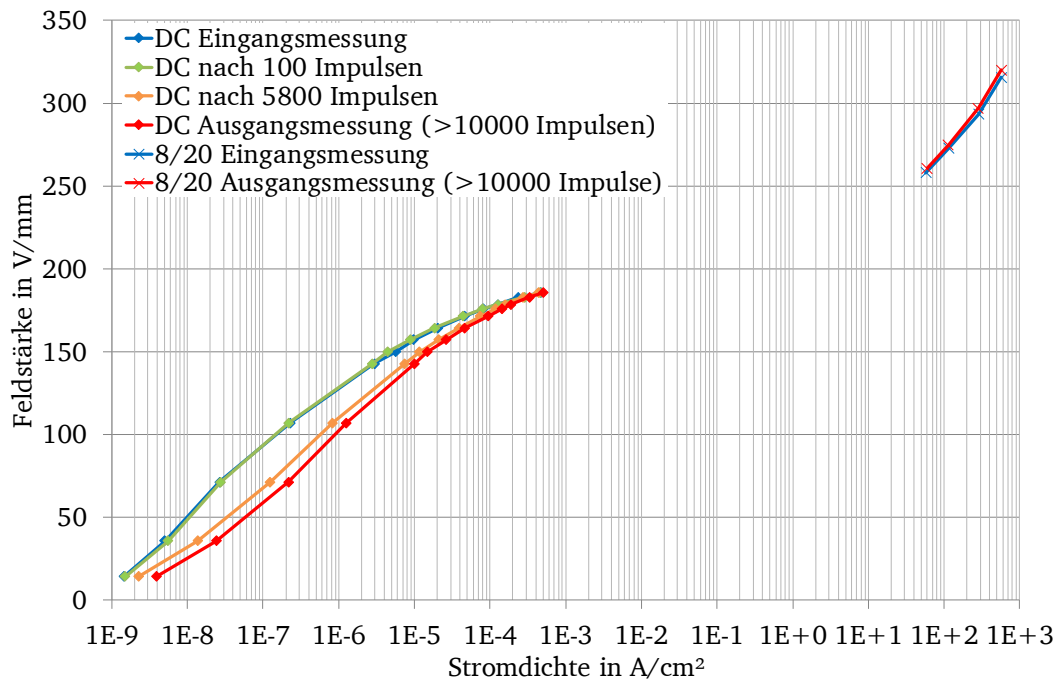


Abbildung 5.3: Veränderung der E - J -Charakteristik im Verlauf des Dauerversuches für eine “reversed” gerichtete Messungen eines einzelnen als gleichstromstabil deklarierten MO-Varistors. Im unteren Gleichstrombereich sind die Messwerte vor Versuchsbeginn (blau mit Rauten), nach 100 (grün); 5 800 (orange) und nach >10 000 (rot mit Rauten) Impulsen im Dauerversuch für den Durchbruchbereich sind die Werte vor (blau mit Kreuzen) und nach (rot mit Kreuzen) dem Dauerversuch dargestellt.

Während *Abbildung 5.2* die Messergebnisse aus einer Messung mit “forward” gerichtetem Strom zeigt, stellt *Abbildung 5.3* die Ergebnisse desselben Varistors nach einer “reversed” gerichteten Messung dar. Bei einem unbelasteten Varistor führen die beiden Messergebnisse (“forward” und “reversed”) der Eingangsmessung (jeweils der blaue Verlauf in den Grafiken) nahezu zu einem identischen Ergebnis. Die Varistoren haben vor Beginn der Belastungen im Dauerversuch nahezu symmetrische Korngrenzregionen, welche erst aufgrund einer Polarisation verzerrt werden (*Kapitel 2.1.2*). Deutlich erkennbar ist, dass auch in dieser Belastungsrichtung vor allem der untere Strombereich der E - J -Charakteristik einer starken Veränderung unterliegt. Gegenüber den Ergebnissen, die durch Messungen in Richtung “forward” entstanden sind, steigt in diesem Fall der Strom über einen größeren Bereich an und erreicht erst zu den maximal gemessenen Gleichspannungswerten hin einen zur Eingangsmessung ähnlichen Wert. Eine Drehung der Charakteristik ist aus den aufge-

nommenen Werten nicht klar zu erkennen. Nach einem Eintrag von 100 Impulsen im Dauerversuch ist hier noch so gut wie keine Veränderung messbar. Dennoch bewirken auch in dieser Belastungsrichtung die zuerst eingetragenen 5 000 Impulse wesentlich mehr als die darauffolgenden. Im Durchbruchbereich sind die Veränderung noch geringer, als es bei der Messung in Richtung “forward“ zu beobachten ist. Diese Tatsache ist aufgrund der unipolaren Belastung innerhalb der Dauerversuche nicht weiter verwunderlich, *Kapitel 2.1.2*. Von den bereits gezeigten Ergebnissen unterscheiden sich diejenigen, die sich bei MO-Varistoren ergeben, die als nicht gleichstromstabil deklariert sind. Beispielhaft zeigt *Abbildung 5.4* das Ergebnis für einen solchen MO-Varistortyp. Die Darstellung ist in vier Grafiken unterteilt. Die Bezeichnung (a) steht hier für Varistoren, die exakt so getestet wurden wie die aus *Abbildung 5.2*, mit einer permanent anliegenden Gleichspannung. Da es sich hier jedoch um nicht gleichstromstabile Varistoren handelt, zeigen die Grafiken, die mit b) bezeichnet wurden, die Ergebnisse für einen Versuch ohne permanent anliegende Gleichspannung, aber sonst gleichen Bedingungen. Die Ziffern geben zusätzlich mit 1 für “forward“ und 2 für “reversed“ Aufschluss über die Stromrichtung während der Messungen. Insbesondere bei den Versuchen mit anliegender Gleichspannung (a) kommt es im Leckstrombereich der E - J -Charakteristik zu grundsätzlich ähnlichen, allerdings wesentlich ausgeprägteren, Degradationen. Wie es schon bei gleichstromstabilen Varistoren beobachtet werden konnte, zeigt hier vor allem der Durchbruchbereich stärkere Veränderungen. Diese liegen durchgängig über den maximal tolerablen 5 % Spannungsänderung. Hier zeigt sich eine deutliche Anhebung des Schutzpegels, die in dieser Form nicht tolerierbar wäre. Auch die Ergebnisse aus den Untersuchungen ohne Gleichspannung (b) zeigen im Durchbruchbereich Veränderungen des Schutzpegels, die außerhalb der 5 % liegen.

Schon basierend auf diesen ersten Ergebnissen ergeben sich Hinweise darauf, dass der Einsatz von als nicht gleichstromstabil deklarierten MO-Varistoren in Gleichstromschaltern aus Sicherheitsgründen nicht zu empfehlen ist. Die Verwendung von minderwertigem Material kann an dieser Stelle ausgeschlossen werden, da es sich um handelsübliche Varistoren des Herstellers handelt, die für den Einsatz im Wechselspannungsnetz vorgesehen und erfolgreich eingesetzt sind. Eine Nichteignung der als nicht gleichstromstabilen MO-Varistoren ist insofern plausibel, als dass es sich auch bei einer reinen Impulsbelastung um eine unipolare Belastung handelt, die sich auf das Material vermutlich ähnlich auswirkt wie eine Gleichspannung. So werden aufgrund der unipolaren Stromrichtung Ladungsträger dauerhaft zu einer Seite der Barriere hin verschoben und tragen daher nicht zu dem Strom während eines 8/20 μ s-Impuls bei, weshalb die Restspannung, die anliegt, wenn 10 kA durch den Varistor fließen, ansteigt.

5 Belastung von MO-Varistoren mit Impuls- und Gleichspannungen

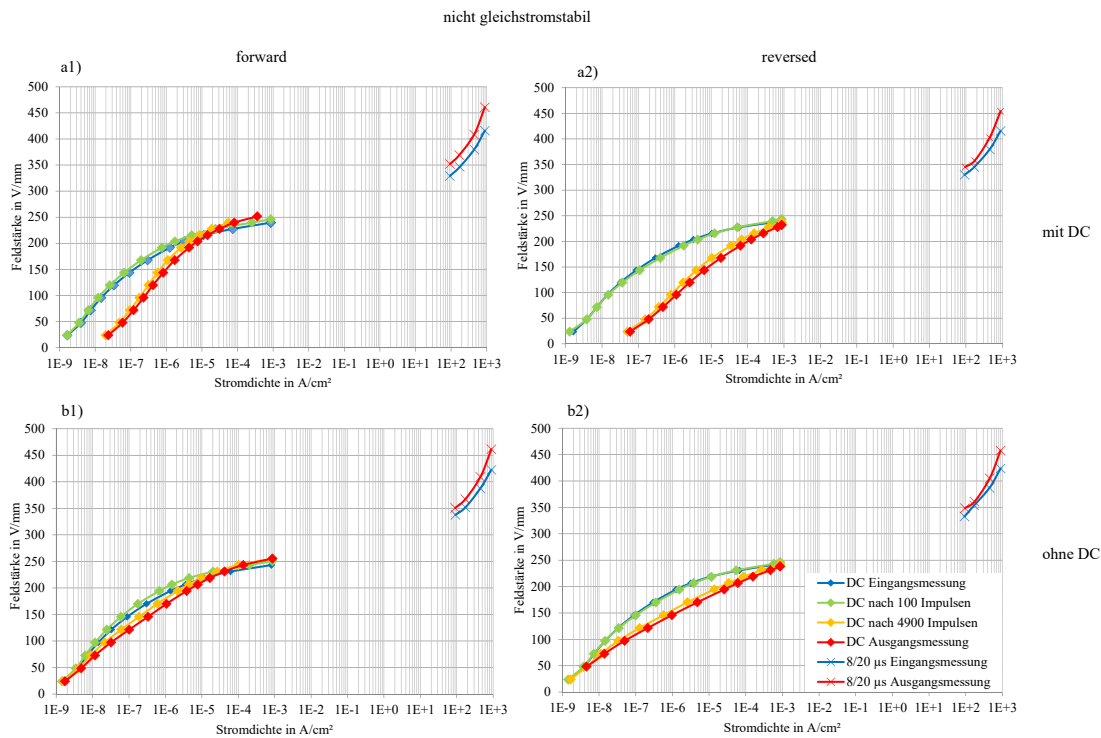


Abbildung 5.4: Veränderung der E - J -Charakteristik im Verlauf des Dauerversuches für eine “forward“ a1) und b1) sowie eine “reversed“ a2) und b2) gerichtete Messung eines einzelnen als nicht gleichstromstabil deklarierten MO-Varistors. a) stellt die Ergebnisse eines Versuches mit und b) ohne permanent anliegender Gleichspannung dar. Im unteren Gleichstrombereich sind die Messwerte vor Versuchsbeginn (blau mit Rauten), nach 100 (grün); 4700 (orange) und nach >10 000 (rot mit Rauten) Impulsen im Dauerversuch gekennzeichnet, für den Durchbruchbereich sind die Werte vor (blau mit Kreuzen) und im Anschluss (rot mit Kreuzen) an den Dauerversuch dargestellt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchung erfolgt mit MO-Varistoren unterschiedlicher Hersteller eine Überprüfung der Annahme, dass Varistoren, die nicht für den Einsatz in Gleichspannungsnetzen geeignet sind, ihren Schutzpegel in einer nicht tolerablen Höhe verändern.

Auch ein infolge der Dauerbelastungen erhöhter Leckstrom, wie er in den aufgeführten *Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.4* zu sehen ist, gilt grundsätzlich als nachteilig, da er die Verluste im laufenden Betrieb erhöht und die thermische Stabilitätsgrenze nachhaltig beeinflusst [GHG2017]. Bei dem Einsatz der Varistoren in den meisten Gleichstromschalterkonzepten kommt es jedoch im Normalbetrieb, innerhalb eines Aufbaus inklusive eines vorgelagerten Lasttrennschalters, nicht zu einem permanenten Stromfluss bei Dauerspannung, da letzterer

den Gleichstromschalter bereits unmittelbar im Anschluss an den Ausschaltvorgang von der Betriebsspannung freischaltet. Somit sind, im Gegensatz zu MO-Varistoren im Wechselspannungsnetz, im Normalbetrieb, *Kapitel 2.3*, keine Folgen durch die Leckstromerhöhung zu erwarten. Anders verhält es sich bei einem Aufbau, in dem der vorgelagerte Trennschalter ausgespart wurde. Hier fließt permanent ein Strom durch den Varistor, wenn der Gleichstromschalter geöffnet ist. Für diesen Fall sind die Varistoren auch im Leckstrombereich strenger zu bewerten.

Die bislang gezeigte Darstellungsform gibt detailliert die Veränderung der E - J -Charakteristik für einen einzelnen Varistor an. Ziel der Arbeit ist es jedoch, die Ergebnisse aller MO-Varistoren, die innerhalb eines Versuches unter gleichen Prüfungsbedingungen untersucht wurden, mit solchen zu vergleichen, die unter Variation einzelner Parameter (wie Umgebungstemperatur, permanent anliegender Gleichspannung und Energiedichte der Impulsstrombelastungen) belastet wurden. Hierfür ist es notwendig, die grafische Aufbereitung zu modifizieren, um die Übersichtlichkeit zu wahren. Zu diesem Zweck werden die Messergebnisse der Eingangsmessung als Basis herangezogen und jegliche Messwerte, die sich innerhalb der Zwischenmessungen sowie der Ausgangsmessung im Anschluss daran ergeben, auf die Eingangsmessung bezogen. Es findet eine Normierung auf den Eingangswert statt. Aus dem gleichen Grund findet eine Auswahl an Messpunkten statt, deren Betrachtung als gute Referenz für das elektrische Gesamtverhalten der Varistoren gilt. Eine sinnvolle Wahl ist der Messpunkt, der der Betriebsspannung entspricht. Für deren Berechnung ist der Referenzstrom aus dem jeweiligen Datenblatt zu entnehmen. Er liegt in der Regel in Form einer Angabe zur Stromdichte vor und variiert von Hersteller zu Hersteller. Die Betriebsspannung entspricht in der Regel 80 % der Referenzspannung und wird im Folgenden in der Form "80 % von U_{ref} " angegeben. Als sinnvoll ist dieser Punkt auf der Charakteristik zu erachten, da es im Bereich dieser Spannung zu der "Drehung" der Kennlinie im Verlauf des Dauerversuches kommt. Zusätzlich hierzu empfiehlt es sich, einen darüber und einen darunter liegenden Wert auf der Kennlinie zu betrachten, um die Drehung im Bereich der Referenzspannung detektieren zu können. Es bieten sich die Wahl der Werte bei 40 % und 100 % der Referenzspannung an. Die zugehörige Feldstärke liegt bei den untersuchten Varistoren zwischen 175 und 229 V/mm bei einer Stromdichte zwischen 0,12 mA/cm² und 0,14 mA/cm². Die entsprechenden Messpunkte sind in *Abbildung 5.5* in einer Prinzipskizze (durch farbige Markierungen gekennzeichnet) zu sehen. Die Referenzspannung lässt sich aus der Feldstärke berechnen, da man im Allgemeinen vereinfacht davon ausgeht, dass es sich hier um ein homogenes Feld handelt und Randeffekte außer Acht lässt, wodurch sich

$$U_{\text{ref}} = \frac{E_{\text{b}}}{h} \quad (5.1)$$

ergibt. Hierbei entspricht h der Höhe des MO-Varistors.

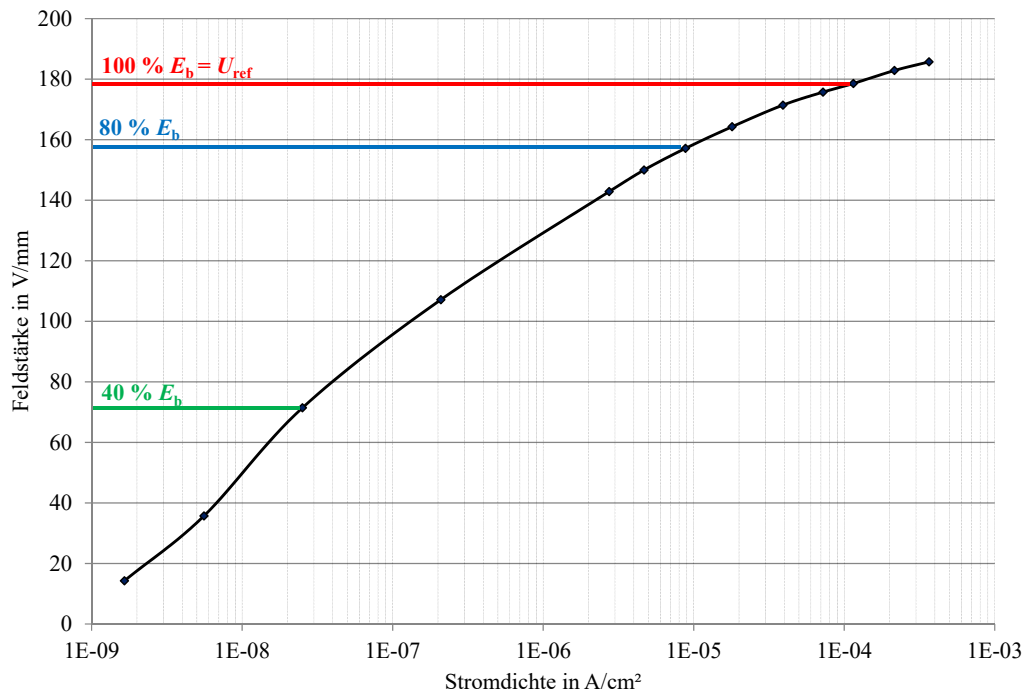


Abbildung 5.5: Referenzpunkte aus der DC-Messung zur Feststellung der Veränderung des Stromes bei 40 % (grün), 80 % (blau) und 100 % (rot) der Referenzspannung im Verlauf des Dauerversuches. Die Darstellung zeigt nur beispielhaft eine E - J -Charakteristik für einen willkürlich gewählten MO-Varistor.

In *Abbildung 5.6* zeigt sich eine typische Leckstromentwicklung für die durchgeführten Versuchsreihen, gemessen in Richtung “forward“. In diesem Fall handelt es sich um die gleiche Versuchsreihe, die auch in den *Abbildungen 5.2* und *5.3* für die Darstellung der vollständigen Charakteristik zu sehen ist. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Abbildungen sind hier die Daten aller vier Prüflinge enthalten, die unter den gleichen Bedingungen³⁴ innerhalb eines Ofens geprüft wurden. Es sind ausschließlich die Messergebnisse der Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich gegeben. In grün dargestellt sind die normierten Stromentwicklungen bei 40 %, in blau bei 80 % und in rot bei 100 % der Referenzspannung. Durch die Normierung aller nachfolgenden Messwerte auf den Eingangswert zeigt ein Anstieg (>1) eine Erhöhung und eine Absenkung (<1) eine Verringerung des Stromes an. Somit wird die Drehung der Charakteristik auch aus dieser Darstellungsform ersichtlich, wo-

³⁴ Wie bereits beschrieben, können aufgrund der Impedanzunterschiede in den Strompfaden sowie der räumlichen Temperaturverteilung innerhalb der Öfen leichte Unterschiede entstehen.

bei der Strom im unteren Leckstrombereich zu- und im oberen Leckstrombereich abnimmt und der “Drehpunkt“ im Bereich des 80 %-Wertes der Referenzspannung liegt. Ebenfalls deutlich erkennbar ist die starke Veränderung zu Beginn des Versuches, die schon nach den ersten 100 Impulsen erheblich nachlässt, um nach rund 2500 Impulsen in eine Sättigung überzugehen. Eine stärkere Beeinflussung der Charakteristik durch erste Energieeinträge wird auch in [Tuc2014] beschrieben. Eine dritte Auffälligkeit deutet sich in *Abbildung 5.6* an. Auch MO-Varistoren, deren Prüfbedingungen nahezu identisch sind, zeigen untereinander auffällige Abweichungen in der Degradation. Dies lässt sich für Varistoren eines Herstellers und eines Produktionsloses beobachten, wie auch [HCH2016] festgestellt und [Tuc2014] angedeutet hat.

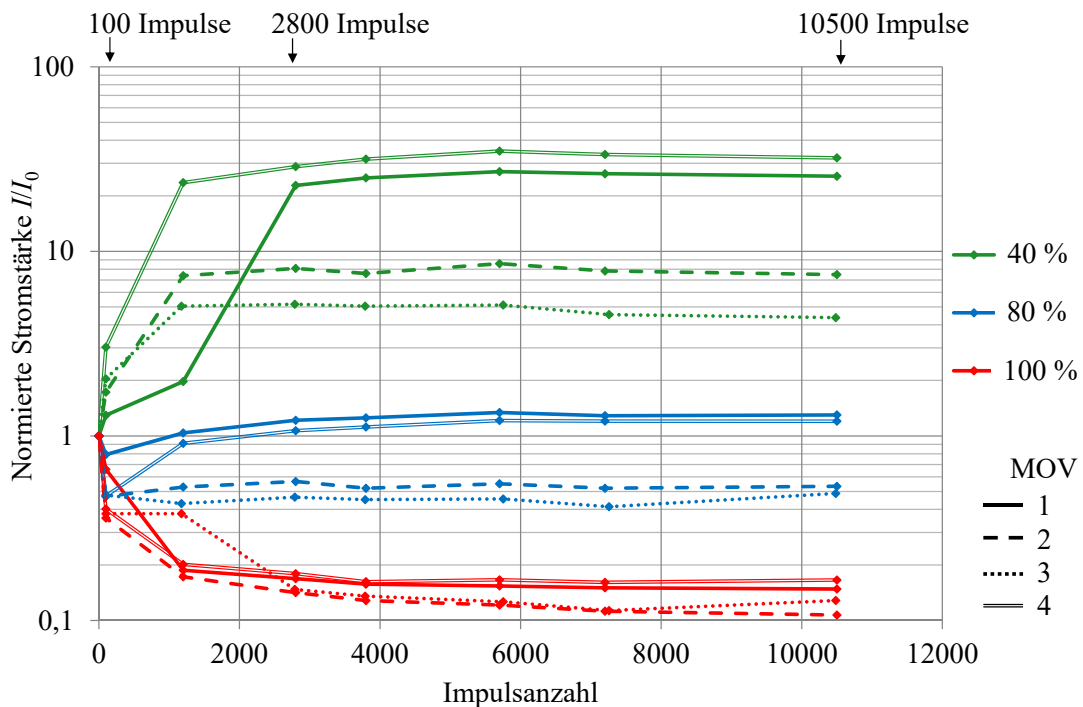


Abbildung 5.6: Veränderung des Stromes bei 40 % (grün), 80 % (blau) und 100 % (rot) der Referenzspannung im Verlauf des Dauerversuches für eine “forward“ gerichtete Messung von vier als gleichstromstabil deklarierten MO-Varistoren gleichen Fabrikates, geprüft unter gleichen Bedingungen.

Der Grund für die auftretenden Unterschiede liegt in der Produktionsweise der Varistoren. Sie bestehen aus einer möglichst homogen durchmischten Pulverkomposition aus verschiedenen Inhaltsstoffen (*Kapitel 2.1.2*). Zwei MO-Varistoren werden jedoch niemals eine absolut identische Materialzusammensetzung aufweisen. Eine weitere Begründung liegt darin, dass

die Rohlinge während des Sinterprozesses einen Ofen auf einem Fließband durchlaufen, auf dem sie einen fest zugeordneten Platz einnehmen und somit relativ zueinander räumlichen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, welche das Kornwachstum beeinflussen können (Kapitel 2.1.1). Dies führt zu einer leicht unterschiedlichen Materialstruktur auf mikroskopischer Ebene. Das erklärt, weshalb es bei den nachfolgenden Darstellungen, die der Übersichtlichkeit halber immer Mittelwerte³⁵ der gemessenen Resultate gleich belasteter Varistoren zeigen, mitunter zu großen Stichprobenabweichungen kommen kann. In der Evaluation der Untersuchungen sind ausschließlich aussagekräftige Zwischenmessungen enthalten.

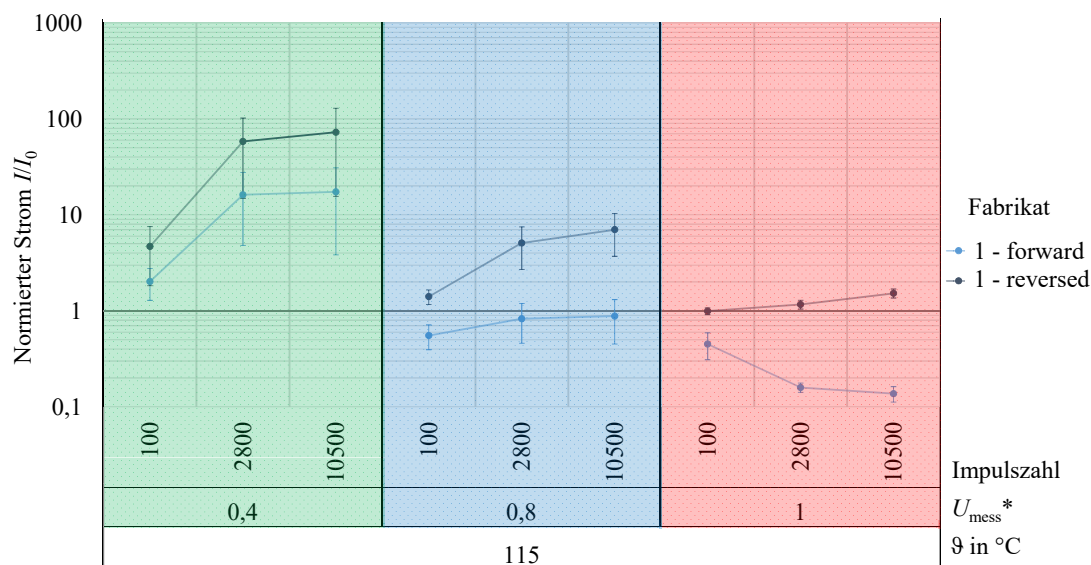


Abbildung 5.7: Übersichtsgrafik der Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich für U_{mess}^* bei 40 %, 80 % und 100 % der Referenzspannung von ausgewählten Zwischenmessungen nach 100, 2800 und 10500 Impulseinträgen, durchgeführt in Richtung “forward” (hellblau) und “reversed“ (dunkelblau) inklusive der Stichprobenabweichungen im jeweiligen Messpunkt. (Datenbasis für “forward“ ist identisch zu *Abbildung 5.6*)

Die Übersichtsgrafik einer Parameterstudie (*Abbildung 5.7*) zeigt die Ergebnisse der Messungen nach etwa 100, 2800 und 10500 Impulsen im mit Gleichstrom charakterisierten Leckstrombereich. Dies entspricht einer jeweiligen Darstellung der Messwerte nach einer festen Impulsanzahl (Abzisse) aus *Abbildung 5.6*. Die Anzahl der eingetragenen Impulsbelastungen pro Varistor entspricht der ersten Ebene der Abzissen-Einteilung in *Abbildung 5.7*,

³⁵ In der Regel kommt es zu einer Mittelung für vier unter gleichen Bedingungen geprüfter Varistoren eines Herstellers.

wobei die Auswahl der ausgewerteten Spannungshöhen (40 %, 80 % und 100 % der Referenzspannung bzw. von U_{ref}) weiterhin beibehalten, aber im Folgenden mit U_{mess}^* bezeichnet ist. Dabei steht U_{mess}^* für das Verhältnis der in der Gleichspannungsmessung anliegenden Spannung U_{mess} zur Referenzspannung U_{ref} . Sie bildet bei den Darstellungen der Ergebnisse aus den Gleichspannungsmessungen immer die zweite Einteilungsebene der Abzisse. Diesen beiden Ebenen übergeordnet, in einer dritten Ebene, befindet sich zusätzlich der variierte Parameter, aufgrund dessen Variation es zu den unterschiedlichen Ergebnissen kommt. In *Abbildung 5.7* entspricht dies der Temperatur ϑ in °C. Abgebildet sind hier erneut die gleichen Daten, die auch *Abbildung 5.6* zu Grunde liegen. Sie sind in dieser Darstellung zu Mittelwerten mit der jeweiligen Stichprobenvarianz zusammengefasst und nur für die genannten Zwischenmessungen bei den ausgewiesenen Impulszahlen ausgewertet. Es gilt zu beachten, dass es sich nur bei den mit Punkten markierten Werten um tatsächlich aus Messwerten generierten Mittelwerte handelt, während die Verbindung zwischen ihnen lediglich der Veranschaulichung des Entwicklungstrends dienen.

Etwas einfacher verhält es sich bei der grafischen Aufbereitung der Degradation im Durchbruchbereich der E - J -Charakteristik. In diesem Strombereich existieren mit wenigen Ausnahmen zwei Messungen (bei 0 und nach 10 500 eingetragenen Impulsbelastungen mit 8/20 μ s-Stromimpulsen). Auch hier bildet die Anzahl der eingetragenen Impulse die erste Ebene der Abzisse. Die Darstellung der Resultate erfolgt im weiteren Verlauf bei den Stromamplituden 2 kA, 5 kA und 10 kA, welche die zweite Ebene der Abzisse bilden. Die dritte Ebene der Abzisse bildet auch in diesem Fall der variierte Parameter, wie die Temperatur, die permanent anliegende Gleichspannung oder die eingetragene Energiedichte während des Impulsstromes.

5.3 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

Basierend auf den Untersuchungen, deren Prüfbedingungen in *Tabelle 5.2* aufgeführt sind, ist es möglich, verschiedene Vergleiche der Messergebnisse aus unterschiedlichen Versuchsdurchläufen zu ziehen. Auf diese Weise lassen sich die Auswirkungen beobachten, die eine Veränderung einzelner Parameter auf die Degradation der MO-Varistoren haben, und inwiefern sich dies bei dem Material verschiedener Hersteller unterscheidet. In *Kapitel 4.1* sind die mithilfe der aufgebauten Versuchseinrichtung beeinflussbaren Parameter aufgeführt. Hiervon sind die Umgebungstemperatur und die permanent anliegende Gleichspannung die Einflussfaktoren, deren Beeinflussung am unkompliziertesten ist. Daher konzentrierten sich die Untersuchungen zunächst hierauf. Zusätzlich findet eine gezielte Betrachtung der Variation der eingetragenen Energiedichte während der Impulsstrombelastungen statt.

Diese Ergebnisse lassen sich noch durch weniger umfangreiche Einzelbetrachtungen zu der Beeinflussung der Degradation durch die Änderung der Stromflussrichtung sowie der ersten eingetragenen Impulsströme in die Varistoren ergänzen. Die Darstellung der Resultate beginnt in jedem Fall mit den Ergebnissen für das Material von Hersteller A. Dies hängt damit zusammen, dass für dieses Material die umfangreichsten Studien vorliegen, da es in größter Anzahl zur Verfügung stand.

5.3.1 Variation der Umgebungstemperatur

Die vorgestellten Ergebnisse sind den Versuchsreihen B, F, I, J, K und L aus *Tabelle 5.2* entnommen und mit Varistoren der Größe a durchgeführt worden. Die Variation der Umgebungstemperatur erfolgt über die Einstellung der Solltemperatur der Umluftöfen, in denen die Varistoren während des Versuches lagern (*Abbildung 2.14*). Es gilt zu beachten, dass die Solltemperatur der Öfen in keinem Fall exakt der Temperatur des MO-Varistors entspricht. Diese ist gegenüber der Ofentemperatur immer leicht erhöht. Der Unterschied ist stark von der elektrischen Belastung und dem damit verbundenen Stromfluss durch die Varistoren abhängig. Zudem schwankt die Varistortemperatur leicht zeitversetzt zu den Stromimpulsen, welche in einem zeitlichen Abstand von etwa 2,5 min erfolgen³⁶. Dies ist der Fall, da sich die Temperatur nach Einbringen der Energie durch den Impuls zunächst im Material ausbreiten muss und die Temperatursensoren, die in einer Aluminiumscheibe unterhalb der MO-Varistoren angebracht sind, dieser nicht unmittelbar ausgesetzt sind³⁷. Ein beispielhafter Verlauf der Temperaturentwicklung über der Zeit in einem eingeschwungenen Zustand ist in *Abbildung 5.8* zu sehen. Während die Isttemperatur des Ofens konstant bleibt (rot), schwankt die am Varistor gemessene im Intervall der eingetragenen Stromimpulse (grün). Die Amplitude ist hierbei abhängig von der eingetragenen Energie während des Stromimpulses und variiert von Versuch zu Versuch um einige Kelvin. Um eine Darstellung verschiedener Versuchsreihen innerhalb einer Übersichtsgrafik realisieren zu können, wird daher nachfolgend in den Abbildungen die Ofentemperatur angegeben. Die Temperaturen während der Zwischenmessungen bleiben davon unabhängig bei 30 °C für den Leckstrom- und Umgebungstemperatur für den Durchbruchbereich der *E-J*-Charakteristik.

Die Auswahl der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Temperaturen orientiert sich an den Temperaturen, die bereits in der Norm in vorhandenen Prüfverfahren von Varistoren, die für den Einsatz in Wechselspannungsnetzen vorgesehen sind, festgeschrieben sind. Dabei handelt es sich vorwiegend um Prüfungen, die eine beschleunigte Alterung

³⁶ Eine Ausnahme bildet Versuch P aus *Tabelle 5.2*, in dem der zeitliche Abstand der Impulse aufgrund der Belastung der anderen Betriebsmittel auf etwa 3 min angehoben wurde.

³⁷ Eine Temperaturmessung mittels Sensor innerhalb des Prüflings ist nicht möglich, da hierfür die Materialstruktur verletzt werden würde.

der Varistoren hervorrufen und damit eine vorangeschrittene Betriebszeit simulieren sollen. Hierbei kommen insbesondere Temperaturen von 60 °C und 115 °C zum Einsatz, wobei ein Betrieb von Überspannungsableitern bei 40 °C zugelassen ist und 115 °C die Temperatur ist, unter der die beschleunigte Alterungsprüfung nach Norm stattfindet. Ein Wert von 60 °C ergibt sich basierend auf einer maximalen Betriebstemperatur von 40 °C, bei der zusätzlich eine Temperaturerhöhung aufgrund einer Potentialschiefverteilung innerhalb des Überspannungsableiters sowie Sonneneinstrahlung berücksichtigt wird. Die 115 °C ergeben sich aus dem Arrhenius-Gesetz, welches herangezogen wird, wenn unter erhöhten Umgebungstemperaturen innerhalb einer Versuchszeit, hier 1 000 h, eine Betriebsdauer von 110 Jahren bei 40 °C zu simulieren sind. Eine Erhöhung der Temperatur auf Werte oberhalb der 115 °C ist laut der IEC-Norm [IEC60099-4] nicht vorgesehen, da sich damit die Alterungsmechanismen verändern könnten. Die IEC-Norm [IEC60099-9] erlaubt bei Innenraumbetrieb der Überspannungsableiter auch eine Betriebstemperatur von 60 °C. Innerhalb dieser Untersuchung wird zum Teil mit 150 °C dennoch eine höhere Temperatur vorgesehen, um die Auswirkung höherer Temperaturen zusätzlich zu evaluieren. *Abbildung 5.9* stellt die Übersicht der Ergebnisse dar, die sich bei einer Variation der Umgebungstemperatur von 60 °C über 115 °C bis 150 °C während der Versuchsreihen mit Varistoren des Fabrikats 1 ergeben haben. Die Grafik ist unterteilt, um einen besseren Überblick zu erhalten. Die Darstellung a) zeigt die Ergebnisse, die mithilfe der Gleichspannungsmessungen nach 100, 2 800 und 10 500 Impulsen in Richtung “forward“ (hellblau dargestellt) und “reversed“ (dunkelblau dargestellt) bei den entsprechenden Zwischenmessungen aufgenommen wurden. In der Darstellung b) sind die Resultate aus den Messungen mit einem Impulsstrom der Form $8/20 \mu\text{s}$ für Stromamplituden von 2 kA, 5 kA und 10 kA vor Versuchsbeginn bei 0 und am Ende nach 10 500 Impulsen zusammengefasst.

Für den Leckstrombereich (Darstellung a)), welcher anhand der eingangs gezeigten Ergebnisse deutlich empfindlicher auf die eingebrachten Belastungen reagiert, zeigt sich unmittelbar aus der Grafik, dass es in den drei Temperaturbereichen für die gemessenen Gleichspannungen immer einen Unterschied zwischen den Messungen in Richtung “forward“ und “reversed“ gibt. Dabei liegen die Veränderungen in Richtung “reversed“ grundsätzlich oberhalb der in Richtung “forward“ und, von einigen Resultaten nach 100 Impulseinträgen abgesehen, immer oberhalb von 1, was eine Zunahme des Stromes bedeutet. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da aufgrund der unipolaren Belastung innerhalb der Versuchszeit eine Orientierung der im Material vorhandenen Ladungsträger erfolgt. Bei einer Umpolung, wie sie bei der Messung in Richtung “reversed“ abläuft, bildet sie sich zum Teil wieder zurück und ist daher mit einem höheren Stromfluss verbunden (*Kapitel 2.1.3*). Läge die Gleichspannung für mehr als 10 s an, bevor es zu einer Erfassung des Messpunktes käme, klänge dieser Ladungsträgerfluss wesentlich ab, und die Ergebnisse könnten sich angleichen.

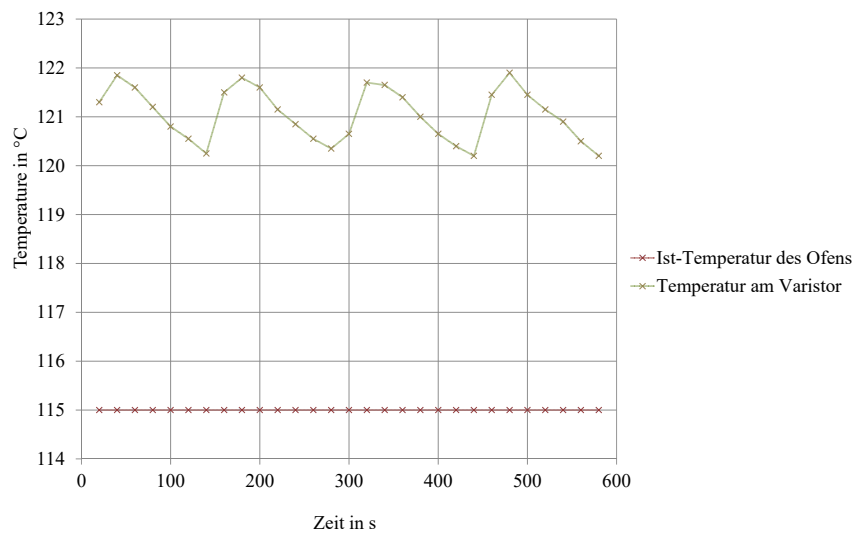
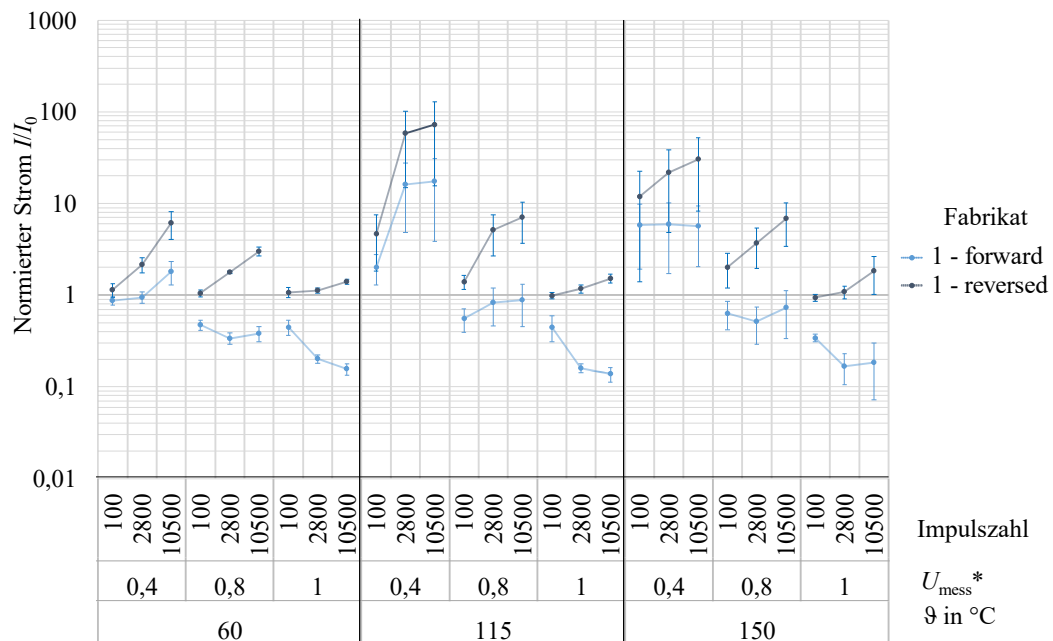


Abbildung 5.8: Temperaturverläufe der Ofenisttemperatur (rot) und der Temperatur an einem belasteten Varistor in dem entsprechenden Ofen (grün) über der Zeit im eingeschwungenen Zustand.

Für die in Richtung “reversed“ gemessenen Gleichspannungswerte erfolgt, basierend auf der angewandten Messmethodik, keine Drehung der Kennlinie, wie auch in der *Abbildung 5.3* im Gegensatz zu *Abbildung 5.2* zu sehen ist. Die Drehung der Charakteristik für Gleichspannungsmessungen in Richtung “forward“, wie in letztgenannter Abbildung zu sehen, kann für das Fabrikat 1 insbesondere bei 115 °C und 150 °C beobachtet werden (*Abbildung 5.9*). Der Unterschied im Vergleich der beiden Umgebungstemperaturen liegt augenscheinlich lediglich in einer stärkeren Abnahme des Stromes im Bereich von $0,4 U_{\text{mess}}^*$ und einer ausgeprägteren Zunahme bei $0,8 U_{\text{mess}}^*$ ($U_{\text{mess}}^* = U_{\text{mess}} / U_{\text{ref}}$ mit der zu Messzwecken angelegten Gleichspannung U_{mess}). Ein Grund hierfür liegt möglicherweise darin, dass hohe Temperaturen zu Regenerationseffekten von reversiblen Veränderungen im Varistormaterial führen, wie es bereits durch die IEC-Norm [IEC60099-4] angedeutet und im Vorlauf zu diesem Kapitel beschrieben wurde.

Es ist davon auszugehen, dass die durch die hier eingetragenen Belastungen bewirkten Degradationen reversibel sind. Die Literatur führt Werte ab 200 °C an [BGR1989], welche bei einer stromlosen Lagerung zu einer umfänglichen Rückbildung verschiedener Materialveränderungen führen kann. Somit könnten geringe Rückbildungen bereits bei 150 °C denkbar sein.

a)



b)

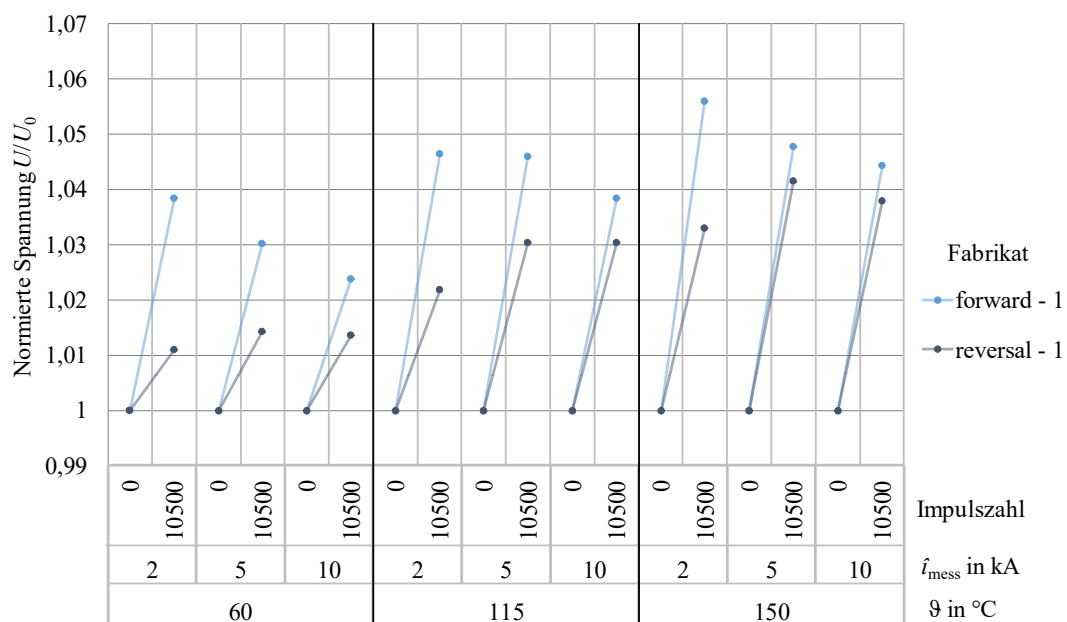


Abbildung 5.9: Parameterstudie zur Auswirkung der Umgebungstemperatur $\vartheta = 60^\circ\text{C}$, 115°C und 150°C , $W'=55\text{ J/cm}^3$ bis 60 J/cm^3 und $U_{\text{test}}^*=0,8$ für Fabrikate 1: a) Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich; b) Impulsstrommessungen der Form $8/20\text{ }\mu\text{s}$ im Durchbruchbereich. Jeweils dargestellt sind Messungen in Richtung “forward“ (hellblau) und “reversed“ (dunkelblau).

Wie bereits erwähnt, wird in der IEC-Norm 60099-4 ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei Temperaturen oberhalb von 115 °C möglicherweise andere Alterungsmechanismen dominieren. Diese Annahmen basieren auf älterem Material. Bei den neusten Varistoren kann derzeit nicht mit Bestimmtheit gesagt werden, dass das Arrhenius-Gesetz noch Gültigkeit besitzt [Cig2017]. Auch das könnte ein Grund für die Auffälligkeiten sein.

Gegenüber 60 °C sind die Veränderungen bei 115 °C im Stromfluss wesentlich stärker. Während es bei den höheren Temperaturen von Beginn an (nach 100 Impulsenergieeinträgen) zu einer erkennbaren Drehung der Charakteristik kommt, erfolgt diese bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C erst nach 10 500 Impulsenergieeinträgen. Bemerkenswert ist die überwiegend auffällig geringe Stichprobenabweichung für die Ergebnisse bei 60 °C, die mit steigender Umgebungstemperatur ebenfalls zunimmt, was sowohl gemessen in Richtung “forward“ als auch in Richtung “reversed“ gilt³⁸.

Für den Durchbruchbereich (Darstellung b)) in *Abbildung 5.9* zeigen sich ebenfalls eindeutige Ergebnisse. In diesem Bereich der *E-J*-Charakteristik liegen die Werte, die in Richtung “forward“ gemessen wurden, kontinuierlich oberhalb derer in Richtung “reversed“. Für die kurzen Impulszeiten macht sich der Effekt einer Umkehr der Belastungsrichtung offensichtlich nicht bemerkbar. Mit steigender Umgebungstemperatur erhöht sich auch der Spannungsanstieg bei gleichbleibendem Strom. Somit sind ggf. vorhandene Erholungseffekte bei Temperaturen von 150 °C nur in dem wesentlich sensibler auf Belastungen reagierenden Leckstrombereich spürbar. Es ergibt sich eine insbesondere bei 60 °C und 150 °C deutlich ausgeprägte Abnahme des Spannungsanstieges von 2 kA über 5 kA bis 10 kA Stromimpulsamplitude für Resultate, die in Richtung “forward“ gemessen wurden, wobei ausschließlich bei 150 °C und einer Stromamplitude von 2 kA eine Überschreitung der als kritisch definierten Spannungsveränderung von 5 % auftritt, welche sich jedoch auf eine Stromamplitude von 10 kA bezieht. Die hier beobachteten Erhöhungen der Spannung sind daher aus derzeitiger Sicht als vollkommen unkritisch zu beurteilen.

Basierend auf den Ergebnissen für Fabrikat 1 bei Umgebungstemperaturen von 60 °C, 115 °C und 150 °C kann für die nachfolgenden Untersuchungen der MO-Varistoren anderer Fabrikate auf Versuche bei 150 °C verzichtet werden. Die höhere Temperatur ergibt keinen Mehrgewinn an Information und strapaziert stattdessen die Versuchstechnik sehr stark. Im Leckstrombereich der Charakteristik scheint die Degradation aufgrund von Erholungseffekten durch die hohe Temperatur sogar weniger stark ausgeprägt zu sein als bei 115 °C und die Unterschiede im Durchbruchbereich sind marginal.

³⁸ Die große Stichprobenvarianz wurde bereits zuvor in *Kapitel 5.2* begründet.

Für die Fabrikate 1 bis 6 ergeben sich damit die beiden nachfolgenden *Abbildungen 5.10* und *5.11*. Sie stellen die Ergebnisse aus Versuchsreihen dar, die bei 60 °C und 115 °C, Impulsstrombelastungen mit Stromdichten von 55 J/cm³ bis 60 J/cm³ und einer permanent anliegenden Gleichspannung von $U_{\text{test}}^* = 0,8$ ($U_{\text{test}}^* = U_{\text{test}}/U_{\text{ref}}$ mit der zu Testzwecken angelegten Gleichspannung U_{test}) entstanden sind. Eine Ausnahme ergibt sich für die Varistoren von Fabrikat 2, für den die Darstellungen zusätzlich einen Verlauf 2(a) beinhalten. Die Versuchsreihe 2(a) erfolgte mit identischen Parametern, aber bei einer permanent anliegenden Gleichspannung von $U_{\text{test}}^* = 1$. Dies kam durch eine im Verlauf dieses Dauerversuchs festgestellte und behobene Fehlfunktion der Gleichspannungsquelle. Der Dauerversuch wurde bei gleichbleibender Belastung beendet, um ihn dennoch auswerten zu können. Auch bei den MO-Varistoren der Fabrikates 5 und 6 gibt es eine Abweichung. Sie wurden bei einer Impulsstromenergiedichte von 90 J/cm³ bis 100 J/cm³ statt bei 55 J/cm³ bis 60 J/cm³ geprüft. Die Begründung hierfür liegt in der zur Verfügung stehenden Anzahl an Varistoren. Vor dem Hintergrund, möglichst hohe Energiedichten zu erzielen, waren hier nur begrenzt Versuchsreihen durchzuführen, weshalb sich von vorn herein für eine höhere Energiedichte entschieden wurde. Der Schritt zu einer noch höheren Energiedichte war aufgrund der gegebenen Prüftechnik und den vorhandenen Varistorgrößen nicht möglich. Dieser Unterschied dürfte lediglich Auswirkungen auf die Höhe der zu messenden Veränderungen der Charakteristik haben. Der direkte Vergleich der erzielten Werte mit denen der anderen Fabrikate ist daher nicht möglich. Eine Beurteilung der Einsatzfähigkeit in einem Gleichstromleistungsschalter ist weiterhin möglich, da Varistoren einer Impulsstromenergiedichte von 100 J/cm³ sicher stand halten können. Es gilt zu beachten, dass die Zwischenmessungen bei verschiedenen Versuchsreihen nicht immer zu identischen Zeitpunkten bzw. nach identischer Anzahl eingetragener Impulse stattgefunden haben. Die Zeitpunkte streuen um die genannten Anzahlen. Der Grund hierfür liegt in den unterschiedlichen zeitlichen Abläufen (unerwarteten Ereignissen, die zu Verzögerungen führen etc.) der Versuchsdurchgänge.

Für die beiden Fabrikate 3 und 4 erfolgten nur Messungen bei 115 °C. Insbesondere Varistoren des Fabrikates 3, die nicht als gleichspannungsstabil deklariert sind, scheinen nicht für den Einsatz geeignet. Dies zeigt sich insbesondere bei den Resultaten aus den Impulsstrommessungen in *Abbildung 5.11*. Dies bestätigt die Eingangs aufgestellte Vermutung, dass in Gleichstromschaltern gleichstromstabile MO-Varistoren verwendet werden sollten. In *Abbildung 5.4* zeigt sich, dass auch ohne das Anlegen einer permanenten Gleichspannung der Durchbruchbereich stärker verändert wird, als es laut [IEC60099-4] tolerabel wäre. Das Gleiche gilt auch für die Prüflinge der Fabrikate 5 und 6, wobei diese nicht wie die anderen Varistoren bei 55 J/cm³ bis 60 J/cm³ sondern, wegen mangelnder Anzahl Varistoren und um möglichst hohe Energiedichten zu erzielen, bei 90 J/cm³ bis 100 J/cm³ geprüft wurden.

Hierauf wird an späterer Stelle noch einmal detaillierter eingegangen. Die *Abbildung 5.10* zeigt die Ergebnisse der Gleichspannungsmessungen mit den bereits genannten Parametern, wobei die Darstellung a) die Resultate gemessen in Richtung “forward“ und b) in Richtung “reversed“ wiedergeben. Grundsätzlich zeigen sich für beide Polaritäten ähnliche Entwicklungen, wie sie bereits für Fabrikat 1 aus der *Abbildung 5.9* entnommen werden konnten. Insbesondere für Fabrikat 2 bzw. 2 (a) ergibt sich ein sehr ähnliches Bild zu Fabrikat 1, wobei die Drehung der Kennlinie bei 115 °C hier weniger stark ausgeprägt ist, was sich insbesondere in einer nur minimalen Erhöhung des Stromes im untersten gemessenen Leckstrombereich ($U_{\text{mess}}^* = 0,4$) bei 115 °C bemerkbar macht. Die Veränderungen für Fabrikat 5 sind dagegen vornehmlich schon bei einer Umgebungstemperatur von 60 °C wesentlich größer als bei den anderen (immer unter der Berücksichtigung der höheren Impulsstromenergiedichte) und zeigt bereits hier eine deutliche Drehung der Charakteristik. Ähnlich, wenngleich weniger prägnant, verhält es sich für Fabrikat 6. Fabrikat 4 zeigt als einziges auch bei 115 °C erst nach 10 500 Impulsen eine Drehung der Kennlinie für die in a) dargestellten Ergebnisse gemessen in Richtung “forward“. Nach 10 500 Impulsenergieeinträgen ergeben sich für alle Varistormaterialien Zunahmen des Stromes über den gesamten betrachteten Spannungsbereich bei “reversed“ gerichteten Messungen. Mit Ausnahme von Fabrikat 5 ist dies schon nach 2 800 Impulsenergieeinträgen der Fall.

Aus dem Vergleich der beiden Temperaturen wird ersichtlich, dass eine Temperatur von 115 °C sowohl in Darstellung a) als auch in b) zu stärkeren Degradationen führt, welche sich tendenziell nach 2 800 eingetragenen Stromimpulsen in ihrer Weiterentwicklung abschwächt. Dies ist bei 60 °C nicht in gleichem Maße erkennbar. Zudem gilt eine zunehmende Sensibilität für die durchgeführten Belastungen im Leckstrombereich, welche mit steigender Spannung abnimmt.

Letzteres bestätigt sich grundsätzlich auch bei der Betrachtung von *Abbildung 5.11*. Hier liegen die Änderungen der Spannung nur bei wenigen Prozent, während im untersten Leckstrombereich Steigerungen von bis zu 9 000 % möglich sind. Dabei bleibt zu beachten, dass es im Leckstrombereich um die Veränderung des Stromes und im Durchbruchbereich um die Veränderung der Spannung geht. In *Abbildung 5.11* sind die Ergebnisse aus den Impulsstrommessungen vor Beginn der Versuchsreihen und nach 10 500 Impulsenergieeinträgen dargestellt. Die Versuchsparameter entsprechen denen, die bereits zuvor für die in den *Abbildungen 5.9* und *5.10* aufgeführten Ergebnisse beschrieben wurden. Grafik a) gibt die Ergebnisse für Messungen in Richtung “forward“, b) für “reversed“ an.

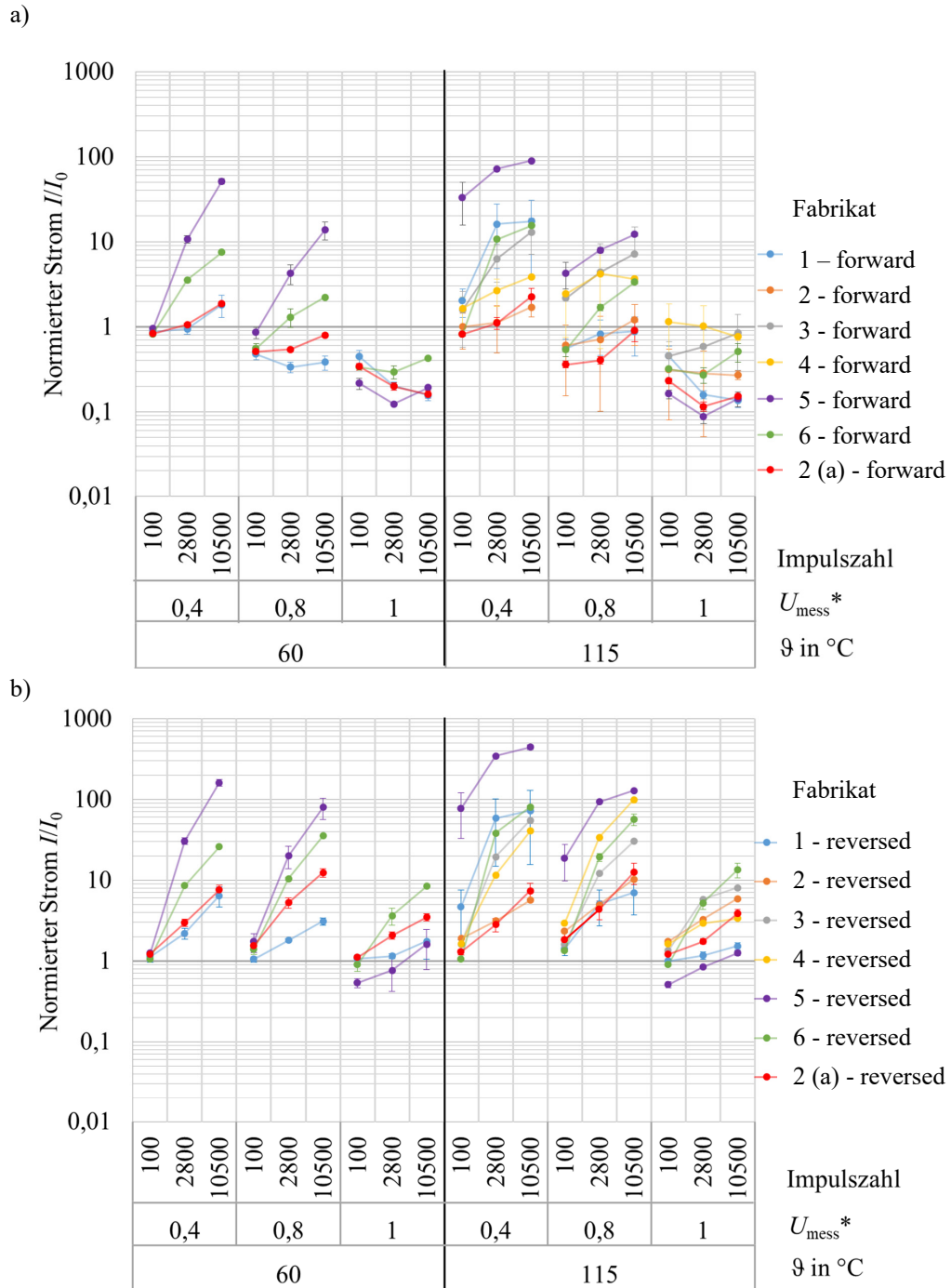


Abbildung 5.10: Parameterstudie zur Auswirkung der Umgebungstemperatur mit der Gleichspannungsmessung nach 100; 2800 und 10 500 Impulsenergieeinträgen für Fabrikat 1 bis 6 (farblich unterschieden) bei $\vartheta = 60\text{ °C}$ und 115 °C ; Impulsenergieeinträge mit $W' = 55\text{ J/cm}^3$ bis 60 J/cm^3 mit Ausnahme von Fabrikat 5 und 6 bei 100 J/cm^3 und $U_{\text{test}}^* = 0,8$ mit Ausnahme von 2(a) bei $U_{\text{test}}^* = 1$: a) gemessen in Richtung “forward”; b) gemessen in Richtung “reversed“.

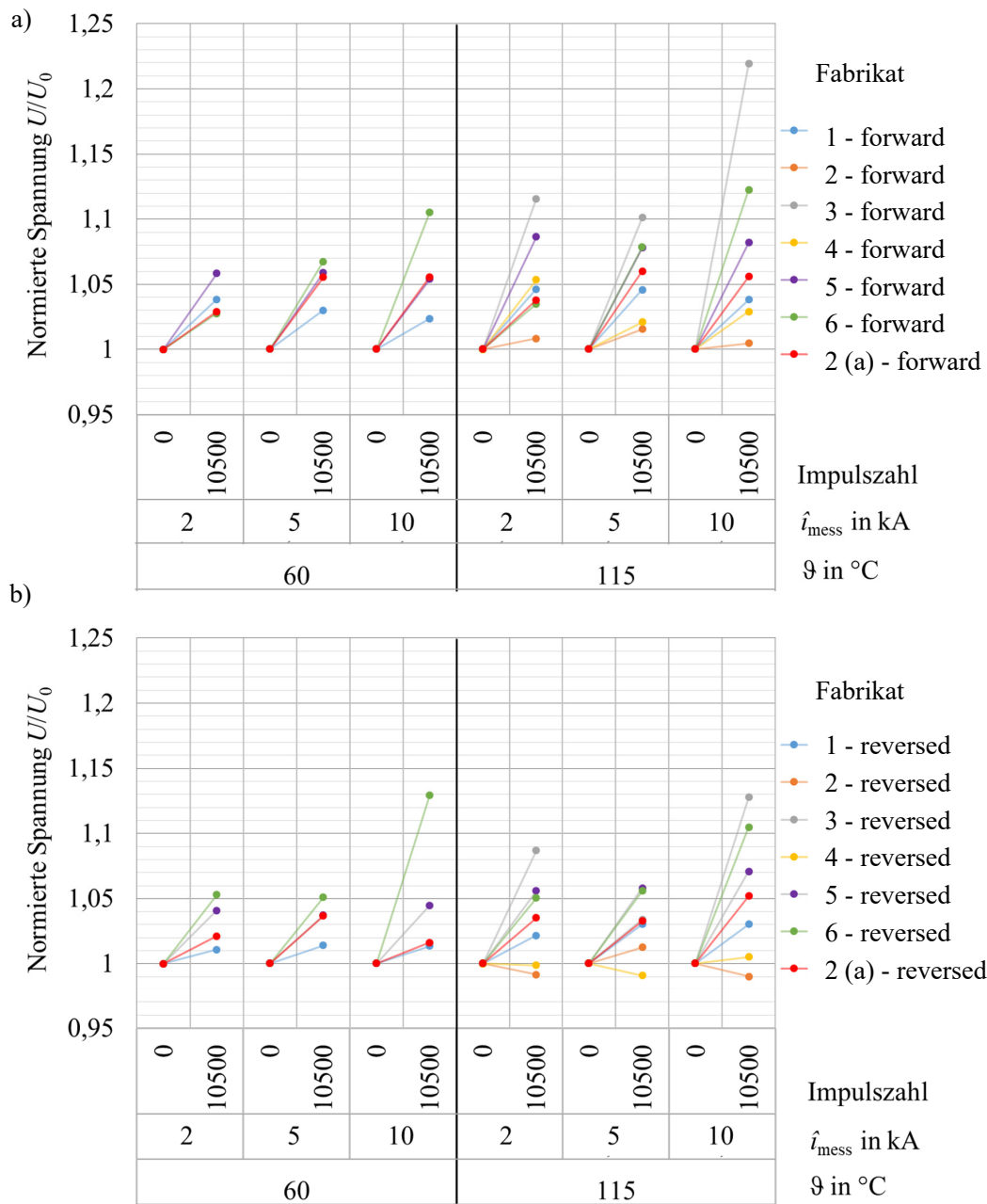


Abbildung 5.11: Parameterstudie zur Auswirkung der Umgebungstemperatur mit der Impulsstrommessung der Form 8/20 μs vor dem Versuch und nach 10 500 Impulsenergieeinträgen für Fabrikat 1 bis 6 (farblich unterschieden) bei ϑ von 60 °C und 150 °C; Impulsenergieeinträge mit $W' = 55 \text{ J/cm}^3$ bis 60 J/cm^3 mit Ausnahme von Fabrikat 5 und 6 bei 100 J/cm^3 und $U_{\text{test}}^* = 0,8$ mit Ausnahme von 2(a) bei $U_{\text{test}}^* = 1$: a) gemessen in Richtung “forward”; b) gemessen in Richtung “reversed”.

Unmittelbar erschließt sich die bereits zu Beginn getroffene Aussage, dass sich die MO-Varistoren der Fabrikate 3, 5 und 6 unter Berücksichtigung der IEC-Norm 60099-4 und einer tolerablen Veränderung der Impulsspannung von $\pm 5\%$ bei einer Stromamplitude von 10 kA nicht für den Einsatz bei den hier geprüften Belastungen eignen. Erneut scheint eine Umgebungstemperatur von 115°C für stärker ausgeprägte Degradationsvorgänge zu sorgen, welche für die Impulsströme von 10 kA ein Maximum aufweisen.

Aus den erläuterten Beobachtungen lässt sich für nachfolgende Versuchsreihen schließen, dass eine Umgebungstemperatur von 115°C einen Wert darstellt, der Degradationsvorgänge in den Materialien verstärkt, wobei eine temperaturbedingte Erholung der Materialstruktur in den Versuchen nicht unmittelbar festzustellen war. Somit findet eine Festlegung der Umgebungstemperatur auf 115°C für nachfolgende Parameterstudien statt. Zusätzlich sind die Ergebnisse der Materialien von Fabrikat 3, 5 und 6 in den folgenden Kapiteln ausgespart, da sie bereits basierend auf den bisherigen Ergebnissen für den Einsatz in einem Gleichstromleistungsschalter als nicht geeignet beurteilt werden können.

5.3.2 Variation der permanent anliegenden Gleichspannungsbelastung

In einer zweiten Studie geht es um die Variation der permanent anliegenden Gleichspannung während der Versuchsserien. Die Variation der Spannung reicht von Versuchen, bei denen keine Gleichspannung angelegt wurde ($U_{\text{test}}^* = 0$) über die bereits bekannten Ergebnisse mit $U_{\text{test}}^* = 0,8$ bis hin zu knapp 1^{39} . $U_{\text{test}}^* = 1$ konnte bei einigen Varistoren nicht ganz erreicht werden, da die Gleichspannungsquellen nicht dafür ausgelegt waren, die für den sich einstellenden Arbeitspunkt notwendige Leistung zur Verfügung zu stellen⁴⁰. Die weiteren Prüfbedingungen ergaben sich in Anlehnung an die bislang beschriebenen Resultate zu einer Temperatur von 115°C bei Impulsenergieeinträgen mit einer Energiedichte von 55 J/cm^3 bis 60 J/cm^3 . Die vorgestellten Ergebnisse sind den Versuchsreihen C, F, K und L aus *Tabelle 5.2* entnommen, die mit Varistoren der Größe a durchgeführt wurden.

Erneut zeigt eine erste Darstellung (*Abbildung 5.12*) die Resultate der zugehörigen Versuchsreihen für Fabrikat 1. Die Grafik unterteilt sich in zwei Einzeldarstellungen. In a) finden

³⁹ Wie aus *Tabelle 5.2* hervorgeht, wurden auch Messungen mit $U_{\text{mess}}^* = 0,4$ und $0,6$ durchgeführt. Die hierbei erzielten Ergebnisse sind allerdings nicht unmittelbar mit den angegebenen Resultaten vergleichbar, da innerhalb der Versuchsreihe ein wiederholter Polaritätswechsel des Belastungsstromes vorgenommen wurde.

⁴⁰ Dies betraf z. B. Hersteller A, bei dem nur $U_{\text{test}}^* = 0,97$ erreicht werden konnte.

sich die Resultate aus den Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich, während b) die Messungen mit Impulsströmen der Form $8/20\text{ }\mu\text{s}$ wiedergibt. Es sind jeweils die Ergebnisse aus den Messungen in Richtung “forward“ (hellblau) sowie “reversed“ (dunkelblau) eingetragen.

Die Darstellung a) in *Abbildung 5.12* macht sehr deutlich, dass sich der Betrieb der MO-Varistoren ohne eine Gleichspannung im Leckstrombereich nicht wesentlich auf die Degradation auswirkt, während es bei permanent anliegender Gleichspannung zu verstärkten Degradationen kommt. Erst mit einer solchen Belastung ist die bereits in *Kapitel 5.3.1* beschriebene Drehung der Charakteristik deutlich zu erkennen. Dabei unterscheiden sich die Resultate bei $U_{\text{test}}^* = 0,8$ und 1 nicht wesentlich voneinander. Eine Begründung hierfür liegt vermutlich darin, dass die hier verwendeten MO-Varistoren durchaus für höhere permanent anliegende Gleichspannungsbelastungen, in diesem Fall ihre Referenzspannung, ausgelegt sind. Auch unter den hier gegebenen Prüfbedingungen ist nach 10 500 Impulsenergieeinträgen lediglich eine leichte Veränderung gegenüber der nach 2 800 zu erkennen. Hieran ändert auch eine im Vergleich zu *Abbildung 5.9* erhöhte permanente Gleichspannungsbelastung nichts. Erneut sind die Veränderungen, die in Richtung “reversed“ gemessen werden konnten, größer als in umgekehrter Richtung. Dies ist aus den bereits vorab genannten Gründen nicht verwunderlich.

Die Darstellung b) in *Abbildung 5.12* zeigt die Impulsstrommessungen im Durchbruchbereich der Charakteristik. Gegenüber einer anliegenden Gleichspannungsbelastung während der Versuchsreihe ergeben sich ohne diese auffallend wenig Veränderungen der Spannungen für die angegebenen Impulsströme. Wie es auch für den Leckstrombereich zu sehen ist, scheint die Höhe der anliegenden Spannung einen geringen Einfluss auf die Spannungsänderung bei den Impulsstrommessungen zu haben. Die Werte liegen für $U_{\text{test}}^* = 0,8$ leicht oberhalb derer bei 1. Die Unterschiede sind so gering, dass aufgrund der Streuung der Ergebnisse einzelner Varistoren einer Produktionscharge untereinander keine ernsthafte Interpretation möglich ist. Die Ergebnisse gemessen in Richtung “forward“ ergeben leicht höhere Werte als diejenigen in Richtung “reversed“.

Die Werte nach 10 500 Impulsenergieeinträgen sind für Impulse mit einer Amplitude von 10 kA im Toleranzbereich von $\pm 5\%$. Auffällig ist, dass erst mit Anlegen einer permanenten Gleichspannung ein Anstieg der Restspannung zu messen ist. Ohne Gleichspannungsbelastung sinkt die Restspannung in beide Richtungen gemessen leicht ab. Hier sind die Veränderungen in Richtung “reversed“ stärker ausgeprägt. Die leichte Abnahme der Restspannung nach Impulsbelastungen lässt sich mit den gängigen Modellvorstellungen nicht erklären. Mit einer anliegenden Spannung steigt sie für beide Stromrichtungen an. Aus der Literatur sind hierfür keine Erklärungsansätze bekannt.

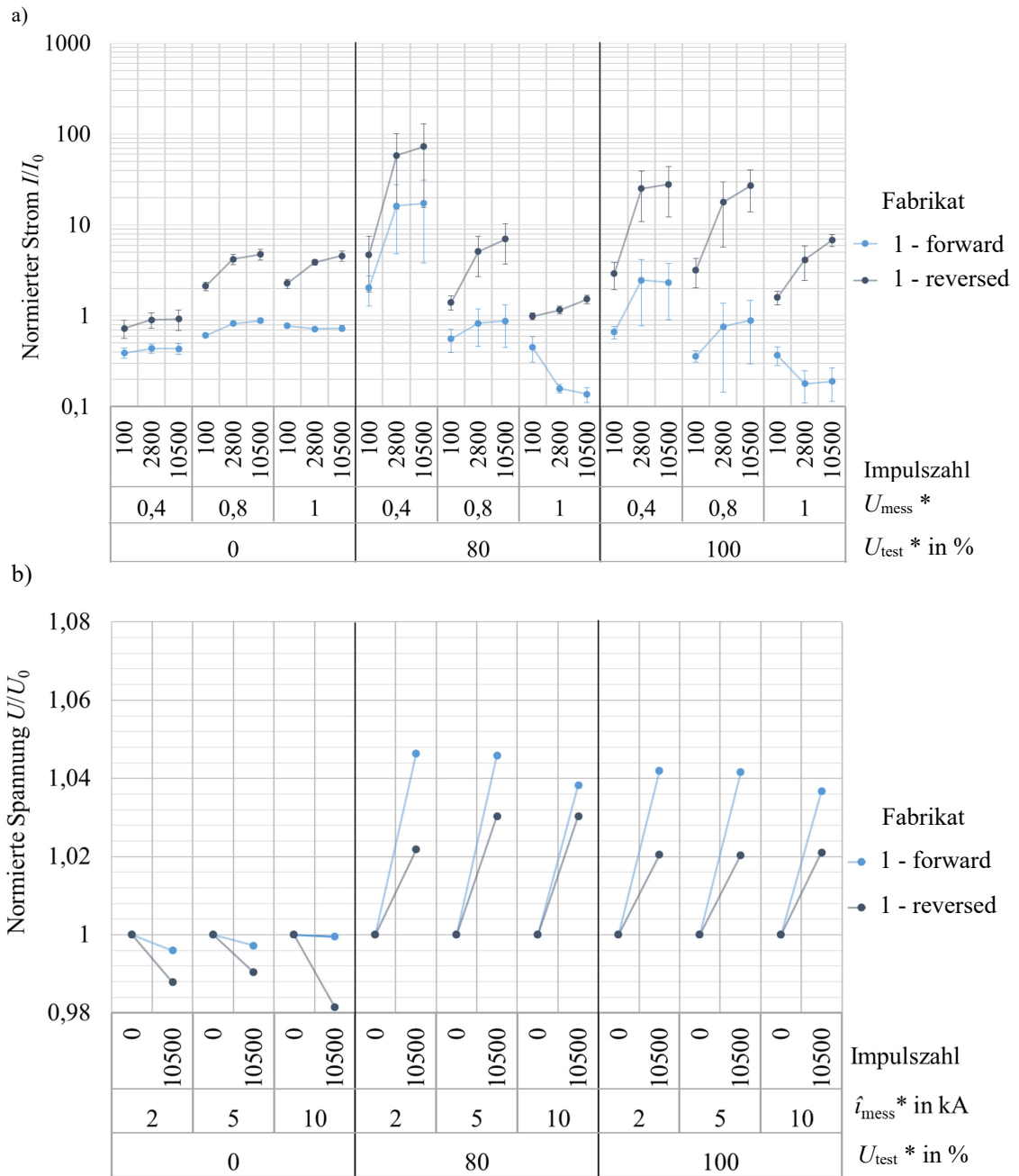


Abbildung 5.12: Parameterstudie zur Auswirkung der permanent anliegenden Gleichspannung für $U_{\text{test}}^* = 0$ und 0,8 und 1 bei 115 °C und 55 J/cm³ bis 60 J/cm³ für Fabrikat 1: a) Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich; b) Impulsstrommessungen der Form 8/20 μ s im Durchbruchbereich jeweils dargestellt Messungen in Richtung “forward“ (hellblau) und “reversed“ (dunkelblau)

Es findet sich des Öfteren der Hinweis, dass im Durchbruchbereich andere Leitungsmechanismen zum Tragen kommen (“Heiße Elektronen“), er aber kaum von Degradation betroffen ist [Den1998, KLN1999, Gup1990, Cig2017]. Möglicherweise führt aber eine reine Impulsbelastung zu einer Verlagerung der Defektzustände, wodurch negative Ladung an den Korngrenzen neutralisiert und Potentialbarrieren herabgesetzt werden. Niedrigere Potentialbarrieren führen bei gleichbleibendem Stromfluss zu niedrigerer Spannung. Ein Anstieg der Restspannung in beide Richtungen bei zusätzlicher Belastung der Varistoren mit einer Gleichspannung könnte durch starke Verlagerungen von Ladungsträgern innerhalb der ZnO-Körner erklärt werden. In Richtung “forward“ stünde dann gegebenenfalls eine wesentlich geringere Anzahl an Elektronen zu Verfügung, die ausreichend beschleunigt werden könnte, um bei gleichbleibendem Feld einen gleichbleibenden Stromfluss zu erzeugen. In Richtung “reversed“ ist der Anstieg der Spannung möglicherweise ebenfalls mit der Verlagerung der Ladungsträger erklärbar, da diese die negative Ladung durch verschobene Defektzustände neutralisieren und somit die Potentialbarriere in diese Flussrichtung ansteigt.

Die Resultate für die Messreihen mit variierter Gleichspannungsbelastung für die Fabrikate 1, 2 und 4 sind in den nachfolgenden *Abbildungen 5.13* und *5.14* zu sehen. Die Darstellungsform unterscheidet sich nicht zu dem vorherigen Kapitel. Für das Fabrikat 4 fanden ausschließlich Belastungen mit $U_{\text{test}}^* = 0,8$ statt. Der geringe Umfang der Messreihen mit MO-Varistoren des Fabrikats 4 liegt in der Tatsache begründet, dass es zum Einen nur wenig Versuchsmaterial gab und zum Anderen, dass die Varistoren dieses Herstellers mehrfach während des Versuches ausgefallen sind.

Abbildung 5.13 zeigt die Veränderungen nach 100, 2 800 und 10 500 Impulsen im Leckstrombereich und bestätigt mit den Ergebnissen für Fabrikat 2 die bereits für Fabrikat 1 erfolgten Beobachtungen. Das Verhalten beider Materialien ist grundsätzlich ähnlich, wobei die Varistoren von Fabrikat 2 eine stärkere Degradation bei einer permanent anliegenden Gleichspannung von $U_{\text{mess}}^* = 1$ aufweisen. Aus den bekannten Gründen sind die Messwerte in Richtung “reversed“ höher als in der Gegenrichtung.

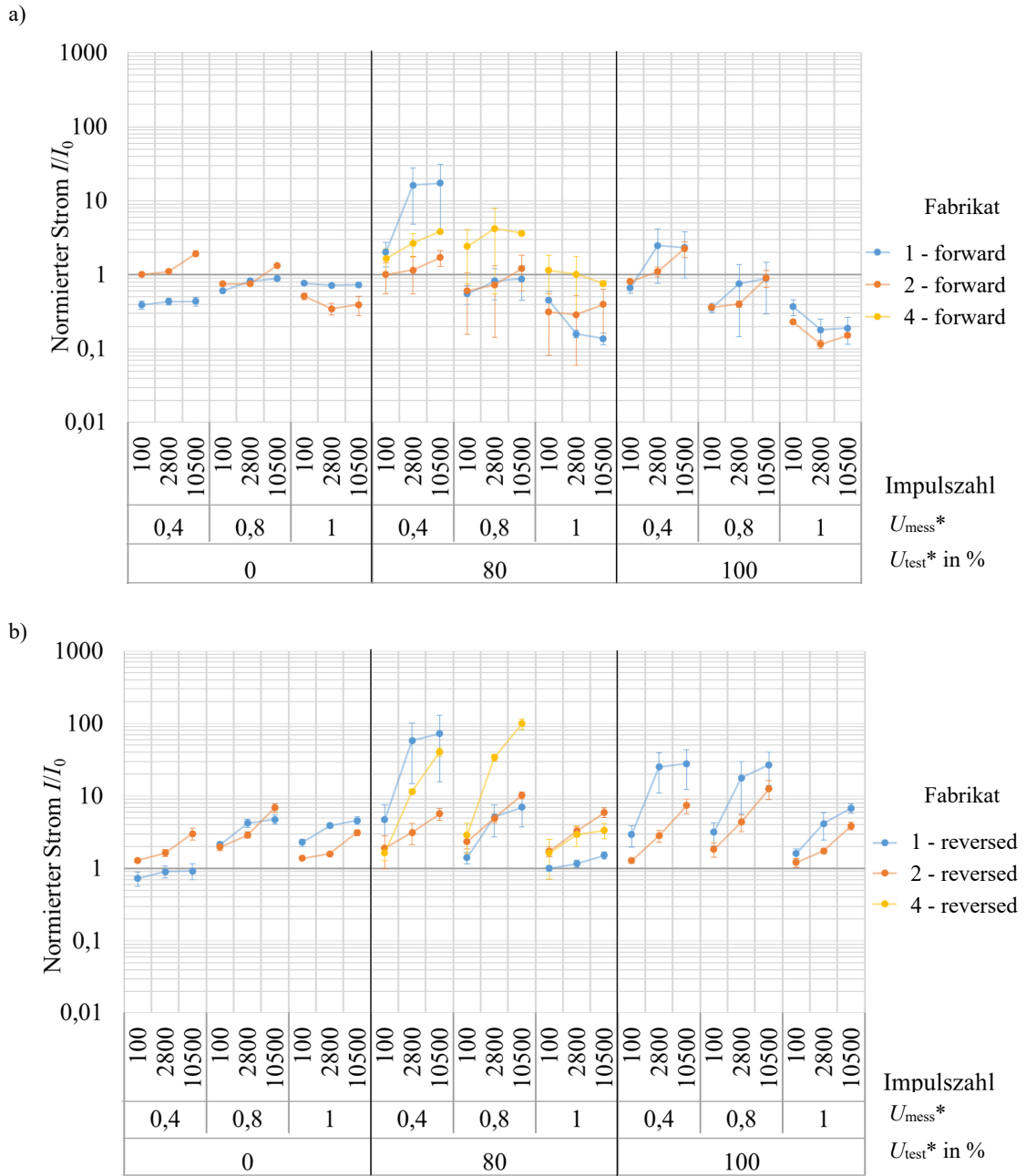


Abbildung 5.13: Parameterstudie zur Auswirkung der permanent anliegenden Gleichspannung mit der Gleichspannungsmessung nach 100; 2800 und 10500 Impulsenergieeinträgen für die Fabrikate 1, 2 und 4 (farblich unterschieden) bei $\vartheta = 115^\circ\text{C}$; W' 55 J/cm³ bis 60 J/cm³ und $U_{\text{test}}^* = 0; 0,8$ und 1: a) gemessen in Richtung “forward”; b) gemessen in Richtung “reversed“. Für Fabrikat 1 konnten, bedingt durch die Leistungsgrenze der Gleichspannungsquellen, nur $U_{\text{test}}^* = 0,97$ erreicht werden.

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muß keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln. *Abbildung 5.14* bestätigt, dass für das Material von Fabrikat 2 eine permanent anliegende Gleichspannung von $U_{\text{mess}}^* = 1$ die Degradation des Materials wesentlich stärker beeinflusst als es $U_{\text{mess}}^* = 0,8$ vermag. Dies ist daran festzumachen, dass unabhängig von der Richtung des Stromflusses während der Impulsstrommessung bei einer Amplitude von 10 kA die 5 % Grenze minimal überschritten, während sie bei $U_{\text{mess}}^* = 0,8$ nicht im Ansatz erreicht wird. Augenscheinlich sind die MO-Varistoren des Fabrikats 2 im Gegensatz zu 1 nicht für eine Belastung mit 100 % des Referenzstromes ausgelegt. Das stellt allerdings keinen Normalbetrieb, sondern lediglich eine hier durchgeführte Erhöhung der Belastung zu Testzwecken dar und ist daher als unkritisches Ergebnis zu betrachten. Dennoch kann anhand dessen festgehalten werden, dass eine Belastung der Varistoren mit einer permanent anliegenden Gleichspannung in jedem Fall zu stärkeren Degradationsvorgängen führt als es ohne diese Belastung der Fall ist. Daher kann diese im Rahmen einer Prüfung des Materials auf Einsatzfähigkeit innerhalb eines Gleichstromleistungsschalters nicht gänzlich außer Acht gelassen werden. Hierbei führt eine Steigerung dieser Gleichspannung nicht zwangsläufig zu einer gesteigerten Entwicklung der Veränderungen in den Varistoren. Aufgrund der Leistungsgrenze der eingesetzten Gleichspannungsquellen innerhalb des Versuchsaufbaus wurde darauf verzichtet, die nachfolgenden Messreihen bei $U_{\text{test}}^* = 1$, sondern stattdessen bei 0,8 durchzuführen. Kommt es während des Betriebes des Gleichstromleistungsschalters zu einer betriebsbedingten Gleichspannungsbelastung der MO-Varistoren, entspricht dieser Wert auch dem Auslegekriterium für die Varistoren und stellt somit keine Verharmlosung der Belastungssituation dar, sondern vielmehr die reale Bedingung. Somit könnten alle drei Fabrikate zum Schutz eines Gleichstromschalters eingesetzt werden.

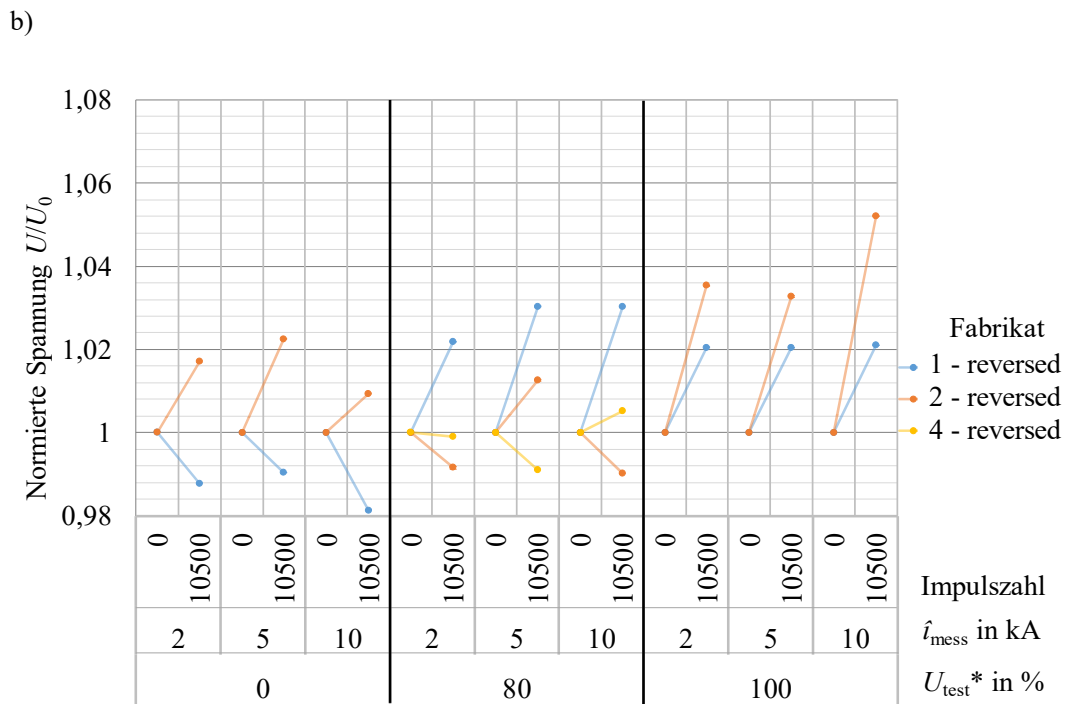
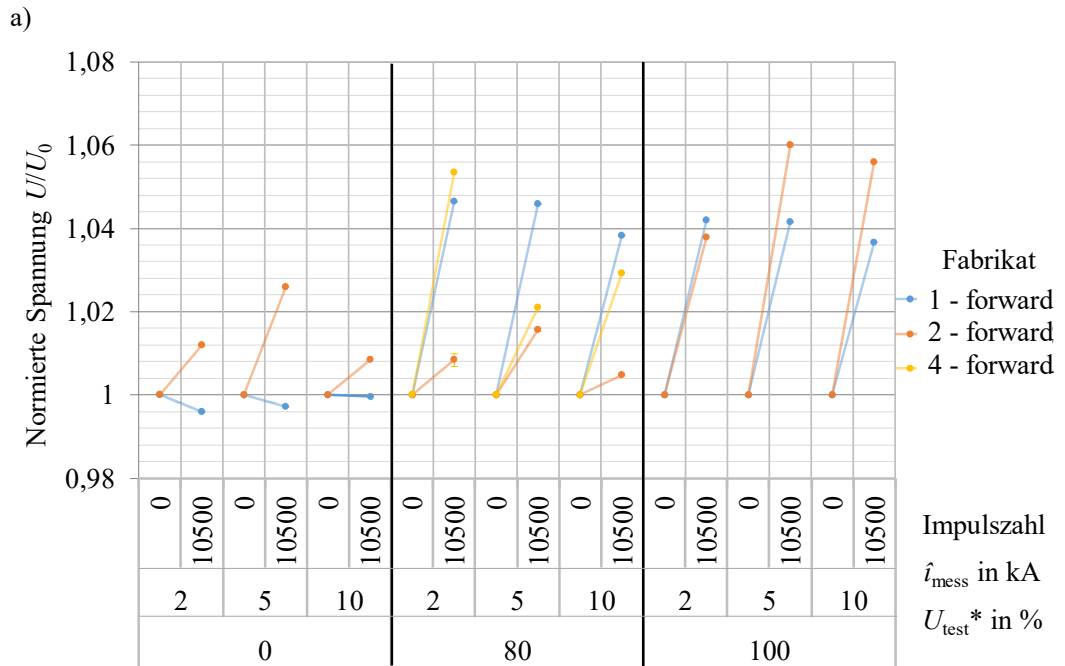


Abbildung 5.14: Parameterstudie zur Auswirkung der permanent anliegenden Gleichspannung mit der Impulsstrommessung der Form 8/20 μs vor dem Versuch und nach 10 500 Impulsenergieeinträgen für die Fabrikate 1, 2 und 4 (farblich unterschieden) bei $\vartheta = 115^\circ\text{C}$; $W' = 55 \text{ J/cm}^3$ bis 60 J/cm^3 und $U_{\text{test}}^* = 0; 0,8$ und 1 : a) gemessen in Richtung “forward“; b) gemessen in Richtung “reversed“. Für Fabrikat 1 konnten, bedingt durch die Leistungsgrenze der Gleichspannungsquellen, nur $U_{\text{test}}^* = 0,97$ erreicht werden.

5.3.3 Variation der Energiedichte der Impulsbelastung

MO-Varistoren sind, je nach Hersteller und Baugröße, dazu in der Lage, wiederholt Energien von bis zu 800 J/cm^3 ⁴¹ während eines Impulsenergieeintrages aufzunehmen. Dieser Wert ist das Resultat aus Versuchsreihen, in deren Verlauf maximal 100 Impulsströme in die Varistoren eingetragen wurden [Tuc2014]. Diese beinhalten damit lediglich einen Bruchteil der Anzahl der Beanspruchungen mit denen die Varistoren innerhalb dieser Untersuchung belastet werden. Die Tatsache, dass die Varistoren von Fabrikat 1 und 2 die Untersuchungen ohne Materialausfälle mit einem weitestgehend positiven Ergebnis abgeschlossen haben, lässt nicht automatisch darauf schließen, dass eine Erhöhung der eingetragenen Energiedichte bei einer derart hohen Anzahl an Einträgen ebenfalls zu einem positiven Ergebnis führt. Um auch bezüglich dieses Parameters genauere Erkenntnisse zu erhalten, erfolgen Versuche mit MO-Varistoren des Fabrikats 1 mit variierender Impulsenergiedichte. Es finden Versuche mit 55 J/cm^3 (diese Ergebnisse wurden bereits vorab wiederholt gezeigt), 110 J/cm^3 und 210 J/cm^3 statt. Diese Reihe lässt sich durch Versuche ergänzen, bei denen keine Impulsstrombelastung in die Varistoren eingetragen wurden. Letztgenannte Untersuchung zeigt, welchen Einfluss die Belastung mit einer permanent anliegenden Gleichspannung für sich allein genommen hat.

Um die Impulsenergiedichte in dem angegebenen Umfang zu variieren, erfolgte zunächst eine starke Erhöhung der Ladespannung des Impulskondensators (*Abbildung 2.14*). Die durch den Versuchsaufbau gegebene Obergrenze für die Ladespannung sorgt hier schon bei einer Energiedichte von 100 J/cm^3 für Herausforderungen. Eine weitere Möglichkeit, die Energiedichte zu erhöhen, liegt darin, die Energie konstant zu halten und das Volumen der Varistoren möglichst stark zu verringern. Hierdurch war eine Erhöhung bis auf eine Impulsenergiedichte von 210 J/cm^3 möglich. Während bei den Untersuchungen mit Energieeinträgen von 0 J/cm^3 und 55 J/cm^3 höhere Varistorblöcke von 7 mm zum Einsatz kommen, sind für die Untersuchungen bei 110 J/cm^3 und 210 J/cm^3 wesentlich niedrigere Varistoren von etwa 3 mm notwendig. Bei Varistoren geringerer Höhe wirken sich geringe Beschädigungen an den Oberflächen ebenso wie auch Fehlstellen im Material stärker aus als bei höheren. Dies kann sich in den Untersuchungsergebnissen widerspiegeln. Die vorgestellten Ergebnisse sind den Versuchsreihen B, E, O, und P mit Varistoren der Größe a aus *Tabelle 5.2* entnommen.

Die Ergebnisse, die sich aus den Untersuchungen mit variierender Impulsenergiedichte für Fabrikat 1 ergeben haben, sind in *Abbildung 5.15* dokumentiert. Die anderen Fabrikate konnten für diese Versuchsreihe nicht berücksichtigt werden, da sie schon im Vorfeld bei

⁴¹ Dies entspricht dem Vierfachen der üblichen Nennenergie

5.3 Darstellung der Untersuchungsergebnisse

kleineren Energiedichten als für den Einsatz nicht nutzbar und damit bei höheren Energiedichten als den Aufbau gefährdend angesehen werden konnten. Im Fall von Fabrikat 2, das bislang wie auch Fabrikat 1 positive Ergebnisse gezeigt hat, liegt der Ausschluss in der Kontaktoberfläche begründet.

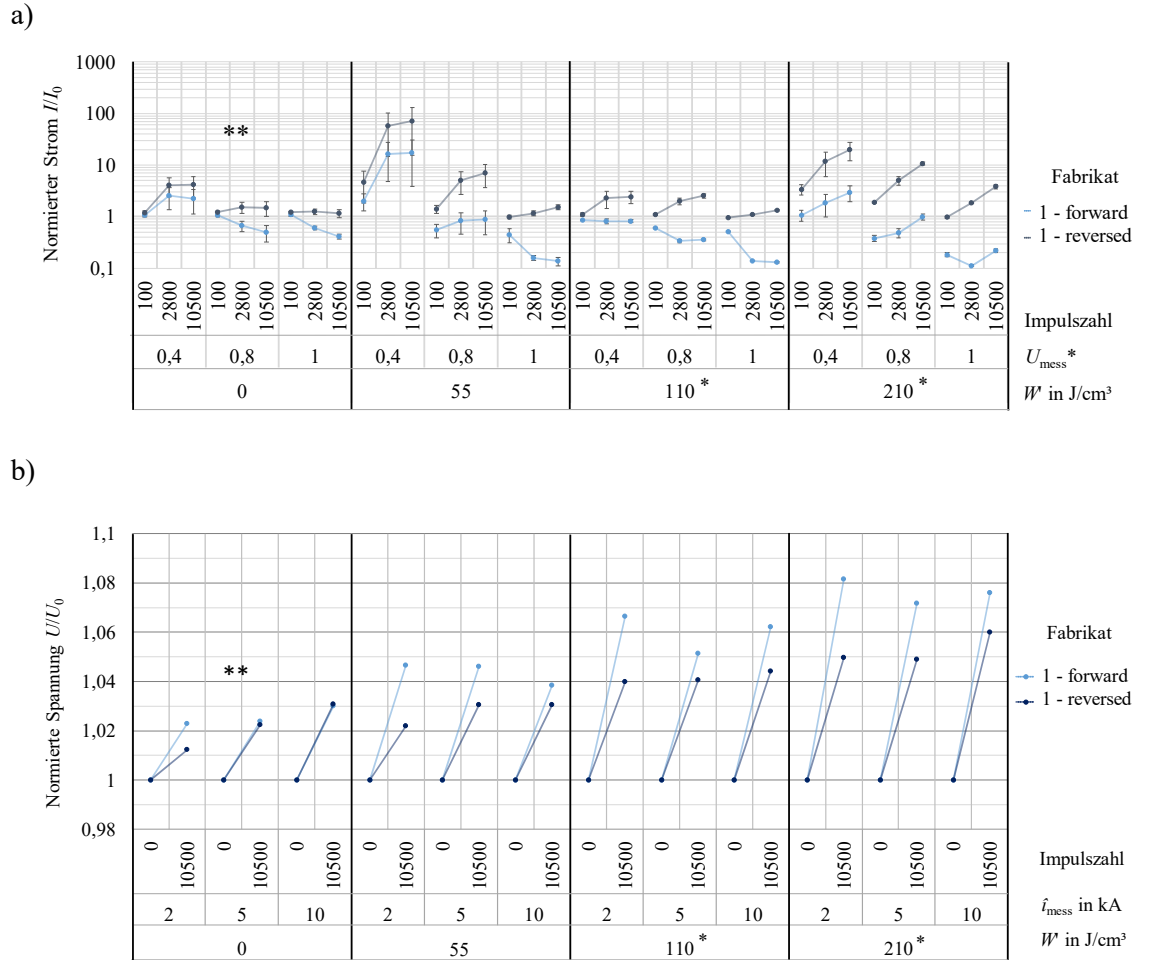


Abbildung 5.15: Parameterstudie zur Auswirkung der durch die Stromimpulse eingetragenen Energiedichte $W' = 0 \text{ J}/\text{cm}^3$; $55 \text{ J}/\text{cm}^3$; $110 \text{ J}/\text{cm}^3$ * und $210 \text{ J}/\text{cm}^3$ * bei 115°C und $U_{\text{test}} = 0,8$ für Fabrikat 1: a) Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich; b) Impulsstrommessungen der Form $8/20 \mu\text{s}$ im Durchbruchbereich jeweils dargestellt Messungen in Richtung “forward“ (hellblau) und “reversed“ (dunkelblau). * Für die Versuche mit $W' = 110$ und $210 \text{ J}/\text{cm}^3$ werden Varistoren geringerer Höhe genutzt. ** Die Angabe der Impulszahlen auf der x-Achse dient nur der einheitlichen Darstellungsform der Versuchsdauer, es wurden keine Impulse eingetragen.

5 Belastung von MO-Varistoren mit Impuls- und Gleichspannungen

Wie bereits in *Kapitel 4.5* erwähnt, benötigten die MO-Varistoren dieses Herstellers eine zusätzliche aufgelötete Ringelektrode auf ihrer aufgedruckten Kontaktierungsschicht. Diese kleine Modifizierung erlaubte die bisherigen Versuche, hielt der Belastung durch die höheren Ströme jedoch schon bei einer Impulsenergiedichte von 100 J/cm^3 nicht mehr stand. Die elektrischen Nenndaten der MO-Varistoren sind *Tabelle 5.1* zu entnehmen.

Während die Energiedichte der Stromimpulse variiert, liegen die übrigen Parameter bei einer Temperatur von 115°C und $U_{\text{test}}^* = 0,8$. Stromamplitude und anfängliche Stromsteilheit variieren von einer Versuchsreihe zu der nächsten sehr stark (2800 A mit $750 \text{ A}/\mu\text{s}$ bei 55 J/cm^3 bis zu 7 kA mit $1600 \text{ A}/\mu\text{s}$ bei 210 J/cm^3 , *Abbildung 5.16*). Dies liegt darin begründet, dass diese drei Parameter sehr stark miteinander verknüpft sind. Eine Beeinflussung nur eines der genannten Parameter gestaltet sich als sehr aufwendig und hätte den Rahmen dieser Arbeit überschritten.

Die *Abbildung 5.15* teilt sich in a) als Übersicht der Resultate aus den Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich und b) die Ergebnisse aus den Impulsstrommessungen der Form $8/20 \mu\text{s}$ für den Durchbruchbereich der E - J -Charakteristik auf. In beiden Darstellungen stehen die hellblau eingefärbten Werte für die Messungen in Richtung “forward” und die dunkelblauen für “reversed“. Obwohl es zu keinen Impulsenergieeinträgen für die Varistoren gekommen ist, die mit einem Energieeintrag der Energiedichte “0“ bezeichnet sind, werden für eine bessere Vergleichbarkeit auf der ersten Ebene der Abzisse Anzahlen an Impulsen angegeben.

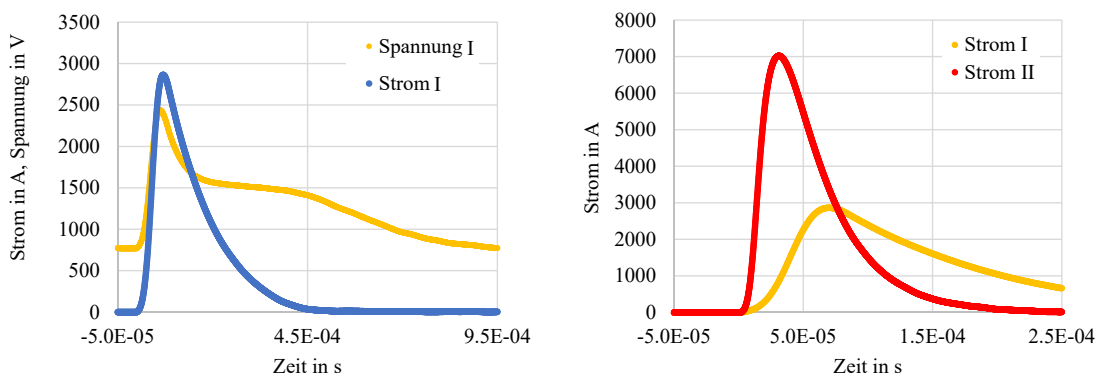


Abbildung 5.16: Vergleich des flachsten und des steilsten Impulsstroms über der Zeit zur Belastung der MO-Varistoren mit verschiedenen Energiedichten im Dauerversuch. Links: der flachere Verlauf (gelb) inklusive Spannung in orange; rechts: wiederholt in gelb der flachere Stromimpuls und in rot der steilere Stromimpuls im direkten Vergleich.

Diese wurden im gleichen Versuch in Varistoren eines anderen Ofens eingetragen, weshalb die Belastungszeiträume identisch sind. Die Grafik a) zeigt, dass eine Belastung ausschließ-

lich mit einer permanent anliegenden Gleichspannung die charakteristische Drehung der unteren Gleichstromkennlinie vermuten lässt (bei in “forward“ gemessenen Ergebnissen). Die Begründung hierfür wurde bereits in *Kapitel 2.1.3* mit der Erläuterung zur Diffusion der Ladungsträger gegeben. Diese nimmt bei zusätzlicher Belastung mit Impulsströmen weiter zu. Die Diffusion der Ladungsträger ist auch der Grund dafür, weshalb der Leckstrom nach 100 Impulsenergieeinträgen mitunter geringer ist, als nach 2 800 oder 10 500 statt. Während der ersten Impulse dominiert die Verlagerung der Ladungsträger durch die unipolare Belastung, der Leckstrom sinkt ab. Mit zunehmender Impulszahl und damit Belastungszeit diffundieren fortlaufend Ladungsträger, und der Leckstrom steigt wieder an. Bei einer Impulsenergiedichte von 110 J/cm^3 entsteht eine Abnahme des Stromes über den gesamten aufgezeichneten Leckstrombereich und es erfolgt keine Drehung mehr. Dies verändert sich bei 210 J/cm^3 wieder, ist jedoch weniger ausgeprägt, als es bei 55 J/cm^3 zu beobachten ist. Grundsätzlich zeigt sich hierdurch allerdings im betrachteten Bereich ein verbessertes Verhalten gegenüber den vorherigen Messungen. Bei jeder der vier Energiedichten liegen die Messergebnisse, die in Richtung “reversed“ gemessen wurden, oberhalb derer in Richtung “forward“. Dies ist nicht weiter verwunderlich, wie bereits in *Kapitel 2.1.3* ausgeführt. Hier findet in jeder Konstellation ein Anstieg des Leckstromes statt.

Im Durchbruchbereich kommt es zu einer kontinuierlichen Steigerung des Spannungsanstieges unabhängig von der betrachteten Stromamplitude und der gemessenen Stromrichtung. Die Anstiege ab einer Energiedichte von 110 J/cm^3 liegen für die Stromamplituden von 10 kA in Richtung “forward“ oberhalb von 5 %. Nach der IEC-Norm 60099-4 und basierend auf den innerhalb dieser Untersuchung erzielten Resultaten für MO-Varistoren in Wechselspannungsanwendungen käme daher ein Einsatz der Varistoren von Fabrikat 1 in einem Gleichstromleistungsschalter nur bis zu einer Belastung im Bereich einer Impulsenergiedichte $W'a \leq 110 \text{ J/cm}^3$ in Frage. Die erkennbare Veränderung im Leck- und die ansteigende Veränderung im Durchbruchbereich können verschiedene Gründe haben. Zunächst muss berücksichtigt werden, dass die Varistoren für den Einsatz in einem Gleichstromleistungsschalter wesentlich größere Abmessungen hätten. Die Herstellung sehr dünner Varistoren ist mit dem Risiko behaftet, dass sich kleine Fehlstellen wesentlich stärker auf das elektrische Verhalten auswirken, als es bei höheren der Fall ist. Um den Einsatz dieses Materials bei höheren Energiedichten als tatsächlich kritisch ansehen zu können, ist es also notwendig, Untersuchungen mit dem Material größerer Abmessung durchzuführen. Neben einer möglicherweise vorhandenen Auswirkung der Höhe ist ein weiterer Erklärungsansatz denkbar. Auch die Beeinflussung durch Stromsteilheit und Energieinhalt der Impulse, die hier jeweils höher liegen als in den vorherigen Versuchen könnten ursächlich für die Veränderungen sein. [BCM2001] geht davon aus, dass steilere Stromimpulse für eine

Vergleichmäßigung der Stromverteilung über dem Varistor sorgen. Das könnte zur Folge haben, dass sich durch die höheren Steilheiten der Impulse wesentlich homogener über das Volumen des Varistors verteilt Sauerstoffionen in die Korngrenzregion verschieben und dort zusätzliche Defektzustände bilden. Diese sorgen bei Anlegen einer Spannung durch das Binden von Ladungsträgern für eine Stabilisierung der Potentialbarriere und damit zu einer Absenkung des Leckstromes. Im Durchbruchbereich stehen ebenfalls weniger Ladungsträger zur Verfügung, die die Stoßionisation auslösen können, und die Restspannung steigt an. Bedingt durch die wesentlich höheren Energieeinträge ist der Vorgang zudem vermutlich ausgeprägter als bei den vorab gezeigten Untersuchungsergebnissen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Frage der genauen Ursache mit dem vorliegenden Material und der vorhandenen Versuchseinrichtung nicht eingehender untersucht werden. In der Versuchsreihe E bei 95 J/cm^3 und einer Amplitude von $6,8 \text{ kA}$ mit Varistoren einer Höhe von etwa $4,5 \text{ mm}$ mit geringeren Anstiegszeit ($820 \text{ A/}\mu\text{s}$) ergeben sich im Kennlinienbereich der Restspannung z. T. ebenfalls starke Veränderungen (*Abbildung 5.19*). Das würde bedeuten, dass minimal höhere Varistoren und eine halbierte Stromsteilheit die Degradation nicht begünstigen. Im Leckstrombereich entsprechen die Änderungen nahezu den hier dargestellten bei 110 J/cm^3 . Aus [Tuc2014] und [Cig2013] geht hervor, dass Stromsteilheit und Energieinhalt für die starke Änderung im Leckstrombereich ursächlich sein könnten, der Durchbruchbereich weist dagegen keine nennenswerten Änderungen auf. Ein direkter Vergleich beider Untersuchungen ist nicht möglich, da in der genannten Literatur wesentlich höhere Ströme bei weniger Energieeinträgen in höhere Varistoren (Mindesthöhe von 30 mm und einem Durchmesser von c. a. 40 mm) eingetragen wurden. Den Einsatz trotz des beobachteten Anstiegs im Durchbruchbereich zu ermöglichen, könnte durch die Erhöhung des Schutzpegels für dieses Anwendungsgebiet realisiert werden, sollte nicht das Volumen der Varistoren für die starke Veränderung verantwortlich sein. Zudem zeigen die Untersuchungsergebnisse in *Kapitel 5.3.4*, dass mehrfacher Polaritätswechsel in der Belastungsstromrichtung bereits eine merkliche Absenkung des Restspannungsanstiegs verursacht. Dies wird auch in [Tuc2014] und [Cig2017] beschrieben. Auch diese Erkenntnis könnte dazu führen, dass das Material trotz des festgestellten Anstiegs einsetzbar wäre. Allerdings würden hier Untersuchungen zum genauen Zeitpunkt des Umpolens für einen sicheren Betrieb notwendig.

Bei Energiedichten von 210 J/cm^3 erfolgt keine Sättigung der Degradationsvorgänge nach rund 2800 Impulsenergieeinträgen, wie sie bislang für die Varistoren dieses Fabrikats zu beobachten war. Im Rahmen der Versuchsreihe kam es sogar zu einem Ausfall eines MO-Varistors nach knapp 6000 Impulsenergieeinträgen. Dies spricht ebenfalls für eine andauernde Veränderung des Materials während der darauffolgenden Impulsenergieeinträge. Der Durchschlag erfolgte im Bereich des Mantels des Varistors. Ein Foto des ausgefallenen

MO-Varistors ist in *Abbildung 5.17* zu sehen. Die Mantelfläche ist aus Gründen der Anonymisierung nachträglich blau gefärbt. Für diesen Ausfall ist vermutlich die Kombination aus Scheibenhöhe und den Impulsparametern Steilheit und Energieinhalt verantwortlich. Die geringe Höhe der Varistoren an sich birgt ein größeres Risiko für einen Durchschlag, da sich, bezogen auf die Höhe, schon sehr geringe Beschädigungen der Oberfläche durch eine Herabsetzung der Spannungsfestigkeit bemerkbar machen. Die Anzahl an steilen und sehr energiereichen Impulsströmen belasten den Varistor zudem sehr stark, insbesondere an den Kanten der Metallisierung. Zusätzlich kam es in Folge einer vorab bereits erkannten Beschädigung der Metallisierung eines anderen Varistors zu dessen Ausfall. Dieser ist jedoch wie auch bei den Ausfällen der Varistoren von Fabrikat 2 und 7 nicht auf eine Materialermüdung, sondern auf ein Problem mit der Kontaktierung zurück zu führen. Mit dem Wissen dieser Ergebnisse lassen sich auch die Ergebnisse für Fabrikat 5 und 6 aus *Kapitel 5.3.1* besser beurteilen. Die Varistoren stammen vom gleichen Hersteller und wurden mit 100 J/cm^3 belastet, sind allerdings nicht gleichstromstabil. Sie zeigen bereits bei dieser Energiedichte eine deutliche Änderung der Restspannung über 5 %. Dies bekräftigt die Vermutung, dass sie für diese Anwendung nicht zu bevorzugen sind.

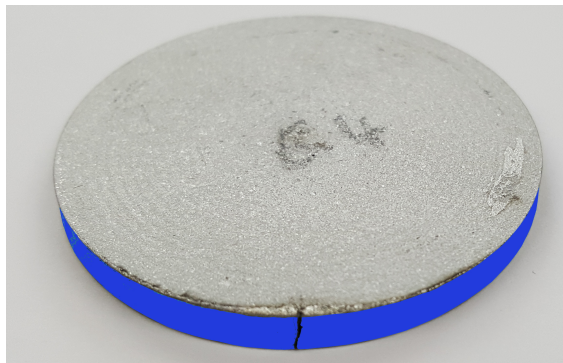


Abbildung 5.17: Foto eines MO-Varistors nach einem Durchschlag durch das Coating bei einer Untersuchung mit 210 J/cm^3 bei $\vartheta = 115^\circ\text{C}$ und $U_{\text{test}}^* = 0,8$. Die Mantelfläche wurde aus Gründen der Anonymisierung auf dem Foto nachträglich blau eingefärbt.

5.3.4 Einzeluntersuchungen

Zusätzlich zu den Parameterstudien fanden auch für einzelne MO-Varistoren Untersuchungen zu Fragestellungen statt, die für weiterführende Betrachtungen und insbesondere grundsätzlich für den Einsatz von MO-Varistoren in Gleichstromleistungsschaltern von Interesse sind. So fanden beispielsweise Untersuchungen dazu statt, inwiefern auch ein Betrieb innerhalb eines Gleichstromschalterkonzeptes, welches während seines Normalbetriebs Spannungen beider Polarität schalten kann, möglich ist. Außerdem konnte durch eine spezielle

Versuchsreihe, während der der Dauerversuch bereits nach einzelnen Impulsenergieeinträgen unterbrochen wurde, um Zwischenmessungen durchführen zu können, gezeigt werden, dass die Degradationvorgänge insbesondere durch die ersten Energieeinträge verursacht sind. Somit konnte die Vermutung bestätigt werden, dass bereits geringere Anzahlen an Impulsbelastungen ausreichen, um die Einsatzfähigkeit der Varistoren beurteilen zu können. Die Darstellung der Ergebnisse beider Untersuchungen sind nachfolgend kurz umrissen. Hierbei kommen Darstellungsformen zum Einsatz, wie sie in *Abbildung 5.6* vorgestellt wurden. Aus den bereits genannten Gründen erfolgten diese Untersuchungen ausschließlich mit Material von Fabrikat 1.

Wiederholter Wechsel der Belastungspolarität

Die Resultate, die der Beurteilung der Frage dienen, inwieweit ein Einsatz von MO-Varistoren auch bei wechselnder Belastungspolarität möglich ist, stammen aus der Versuchsreihe E in *Tabelle 5.2*. Dieser Dauerversuch lief bis zu einer Anzahl von 24 600 Impulsenergieeinträgen pro belastetem Varistor. Hierbei fanden zwei Polaritätswechsel statt, der erste nach 10 450 Impulsen, und ein zweiter Wechsel nach 21 600 Impulsen zurück zur anfänglichen Belastungspolarität. Es gilt zu beachten, dass in den nachfolgenden Darstellungen die Stromrichtungen in den Messungen nicht mit der Belastungsrichtung während des Versuches geändert worden ist. Dies bedeutet, dass innerhalb des Intervalls von 10 450 bis zu 21 600 Impulsenergieeinträgen die mit “forward“ benannte Zwischenmessung entgegen der eigentlichen, im Dauerversuch vorherrschenden Belastungsrichtung gemessen ist und umgekehrt. Nach 21 600 Impulsenergieeinträgen stimmen Belastungs- und Stromrichtung während der Zwischenmessung wieder überein. Hierdurch können die Folgen der Umpolung unmittelbar aus der jeweiligen Darstellung abgelesen werden. *Abbildung 5.18* zeigt die Ergebnisse aus den Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich für vier MO-Varistoren, deren Belastung bei 115 °C, $U_{\text{test}}^* = 0,8$ und einer Energiedichte von 95 J/cm³ stattfand. Wie auch in der *Abbildung 5.6* sind die Messwerte im unteren Spannungsbereich ($U_{\text{mess}}^* = 0,4$) grün, im mittleren Bereich ($U_{\text{mess}}^* = 0,8$) blau und der obere Bereich ($U_{\text{mess}}^* = 1$) in rot dargestellt.

Mehrere Details sind unmittelbar ersichtlich. Es kam im Verlauf des Versuches zu einem Abbruch des Versuches bei zwei Varistoren. Beide Fälle ereigneten sich im Anschluss an die ersten 10 450 Impulse: der erste nach 14 200 Impulsenergieeinträgen, weshalb an dieser Stelle die jeweils durchgängig verlaufenden und nicht vollständig gefärbten Verläufe stoppen. In diesem Fall zeigte der Varistor Risse auf seiner Metallisierung. Dies war eine Folge einer Fehlfunktion der Versuchseinrichtung, die dazu geführt hat, dass der Varistor wesentlich stärker belastet wurde als es der Versuchsablauf vorsieht.

Die Beschädigung der Metallisierung führt dazu, dass ein Durchschlag wesentlich wahrscheinlicher wird. Ein direkter Ausfall eines Varistors gefährdet seinerseits die Versuchsanordnung, weshalb von einer weiteren Belastung des Varistors innerhalb des Versuchs abgesehen wurde. Es lag kein direkter Ausfall vor. Im weiteren Verlauf wurde ein zweiter MO-Varistor aus dem Versuch genommen. Dieser erfuhr bis zu diesem Zeitpunkt eine Belastung von 21 600 Impulsenergieeinträgen.

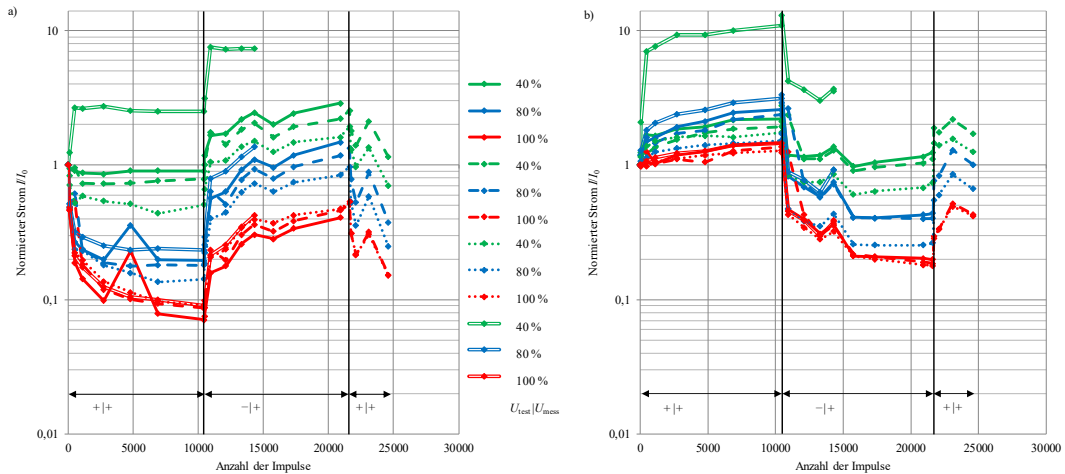


Abbildung 5.18: Degradation im Leckstrombereich, gemessen mit Gleichspannung; a) in Richtung “forward“; b) in Richtung “reversed“ gemessen, bei einer Messreihe mit $W' = 95 \text{ J/cm}^3$ bei 115°C und $U_{\text{test}}^* = 0,8$. Untersucht an 4 Mustern von Fabrikat 1. Wechsel der Test-Polarität nach 10450 und 21600 Impulsen.

Daher enden hier die Verläufe, die durchgängig und vollständig ausgefüllt bzw. unausgefüllt sind. Die Wechsel der Belastungspolarität sind über den gesamten aufgenommenen Messbereich gut zu erkennen. Sie führen in Richtung “forward“ wie auch in “reversed“ zu nahezu sprunghaften Veränderungen in den Stromentwicklungen. Dies ist nicht verwunderlich, wie bereits in *Kapitel 2.1* beschrieben. Aufgrund der veränderten Belastungsrichtung kehren sich vorab erfolgte Polarisierungseffekte im Material ebenfalls um und Ladungsträger verlagern sich innerhalb der Korngrenzregionen. Dabei erfolgt nach einem Polaritätswechsel und der Umoorientierung der Ladungsträger im Material keine stärkere Veränderung des Stromes als zuvor. Zu erkennen ist dies in *Abbildung 5.18* im Vergleich der Intervalle 0 bis 10 450 Impulsenergieeinträge in der linken Darstellung (“forward“) mit dem von 10 450 bis 21 600 in der rechten Darstellung (“reversed“) und umgekehrt. Hier führt der Polaritätswechsel nicht zu stärkeren Degradationen, als sie bereits zuvor zu erkennen sind, sondern viel mehr zu geringeren. Das spricht dafür, dass die Varistoren durch gelegentliche Polaritätswechsel nicht beeinträchtigt werden. Um dies abschließend beurteilen zu

5 Belastung von MO-Varistoren mit Impuls- und Gleichspannungen

können, ist es notwendig, auch die Messungen im Durchbruchbereich der Charakteristik mit Impulsströmen zu betrachten. Die Resultate dieser Messungen sind in *Abbildung 5.19* zu sehen. Die Grafik enthält zwei Darstellungen, wobei links auch hier die Resultate aus den in Richtung “forward“ und rechts in Richtung “reversed“ durchgeführten Messungen wiedergegeben sind.

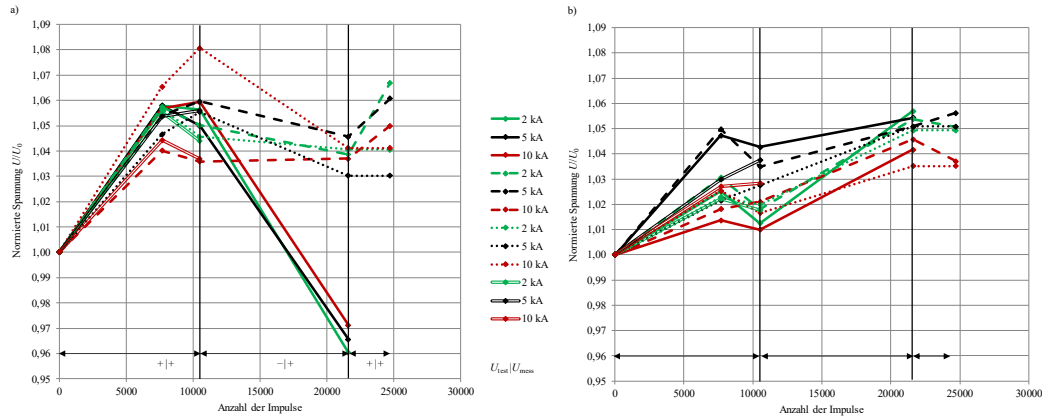


Abbildung 5.19: Degradation im Durchbruchbereich, gemessen mit Impulsströmen der Form $8/20\mu\text{s}$; links: in Richtung “forward“; rechts: in Richtung “reversed“ gemessen, bei einer Messreihe mit $W' = 95\text{ J/cm}^3$ bei $\vartheta = 115^\circ\text{C}$ und $U_{\text{test}}^* = 0,8$. Untersucht an 4 Mustern von Fabrikat 1. Wechsel der Test-Polarität nach 10450 und 21600 Impulsen.

Dabei stehen die grün gefärbten Messwerte für die Ergebnisse, die bei Amplituden von 2 kA erzielt wurden, schwarz 5 kA und rot 10 kA. Auffällig erscheinen die Werte des gepunktet dargestellten MO-Varistors (in Richtung “forward“), die für 10 kA schon nach 7700 Impulsen eine Veränderung über 5% zeigt. Sie steigt auf bis zu 8% nach 10450 Impulsenergieeinträgen weiter und nimmt im Anschluss daran wieder ab. Dieser Varistor ist keiner der beiden aus dem Versuch genommenen. Möglicherweise hat sich auch hier der Polaritätswechsel positiv auf das Degradationsverhalten ausgewirkt. Aus den Messergebnissen lässt sich nicht eindeutig erkennen, nach welcher Anzahl an Impulsenergieeinträgen ein Polaritätswechsel stattgefunden hat.

Aus dieser Untersuchung ergibt sich, dass die MO-Varistoren von Fabrikat 1 auch für den Einsatz in Gleichstromschalterkonzepten geeignet sind, die innerhalb ihres Normalbetriebs Ströme beider Polarität schalten können. Ein gelegentlicher Polaritätswechsel erscheint durch die hier erzielten Ergebnisse sogar eine positive Auswirkung zu haben. Diese Erkenntnis geht auch aus [Cig2017] hervor, in der festgestellt wurde, dass sich ein regelmäßiges Umpolen während der beschleunigten Arbeitsprüfung mit Gleichspannung günstiger auf das Ergebnis auswirkt, als ein einmaliges Umpolen gegen Ende der Prüfung.

Degradation während der ersten Impulsenergieeinträge

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf bereits zuvor erwähnte Vermutungen, dass sich durch die ersten eingebrachten Impulsenergieeinträge die stärksten Änderungen in der E - J -Charakteristik ergeben, wie es auch in [Chr2001] nachzulesen ist. Hierfür wurde ein Varistor aus Fabrikat 1 in wesentlich kürzeren Intervallen vermessen. In diesem Fall bereits nach einem ersten Impulsenergieeintrag und im weiteren Verlauf nach 3, 5, 10, 30, 50, 100 und 201 Impulsenergieeinträgen. Im Gegensatz zu den standardisierten Verfahren erfolgten hier zusätzlich bis zu einer Impulsanzahl von 50 zu der üblichen Gleichspannungsmessung im Leckstrombereich auch Messungen im Durchbruchbereich mit Stromimpulsen der Form $8/20\text{ }\mu\text{s}$. Aufgrund des zeitlichen Aufwands fanden die Messungen nur mit einem einzelnen MO-Varistor und nur bis zu einer Anzahl von 201 Impulsenergieeinträgen statt. Es handelt sich um ein exemplarisches Ergebnis, dass sich auch in der Literatur wiederfindet [Chr2001]. In *Abbildung 5.20* sind die Ergebnisse für die Gleichspannungsmessungen im Leckstrombereich der E - J -Charakteristik gegeben. Es gilt die auch zuvor verwendete Farbaufteilung für die unterschiedlichen Spannungsebenen (grün: 0,4; blau: 0,8 und rot: 1 für U_{mess}^*). Dabei stellt Grafik a) die Resultate aus den Messungen in Richtung “forward“ und b) in “reversed“ dar. Insbesondere die Ergebnisse, die in Richtung “forward“ gemessen sind, bestätigen die Vermutung, dass sich aufgrund der ersten Impulsenergieeinträge die stärksten Veränderungen ergeben. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bereits im Anschluss an den ersten Impuls eine Verringerung des Stromes um bis zu 50 % bei $U_{\text{mess}}^* = 0,4$ (den niedrigsten Spannungspegel) ergibt. Auch die darauffolgenden Impulsenergieeinträge verursachen noch starke Degradationsvorgänge, aber schon nach den ersten 10 Energieeinträgen schwächt sich dies ab. Im Anschluss daran finden weiterhin Veränderungen statt. Sie rufen allerdings nicht mehr Stromreduzierungen im gleichen Maß hervor. Schon ab einer Anzahl von 30 eingetragenen Stromimpulsen ergibt sich im Dauerversuch das gewohnte Bild der Kennlinienveränderung, bei der die stärkste Absenkung des Stromes im obersten aufgenommenen Gleichspannungsbereich entsteht. Sie verringert sich bis hin zum niedrigsten Spannungswert. Die Tendenz nach 201 Impulsenergieeinträgen zeigt deutlich, dass es auch bei dieser Untersuchung im weiteren Verlauf zu einer Drehung der Kennlinie käme, da die Messwerte für $U_{\text{mess}}^* = 0,8$ nach 50 Energieeinträgen beginnen anzusteigen. Auch [Tuc2014] zeigt, dass die Belastung durch mehrere Impulse, in der genannten Untersuchung bis zu 20 Impulsströme zu einem Anstieg der “charakteristischen“ Spannung führt. Dies ist faktisch das Gleiche, wie hier gezeigt die Absenkung des Stromes für $U_{\text{mess}}^* = 1$. Es ergeben sich auch hier die stärksten Änderungen durch die anfänglichen Belastungen. Auch in [Cig2017] werden solche Erfahrungen beschrieben. Die Ergebnisse aus den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen in Richtung “reversed“ lassen ähnliche Schlussfolgerungen zu.

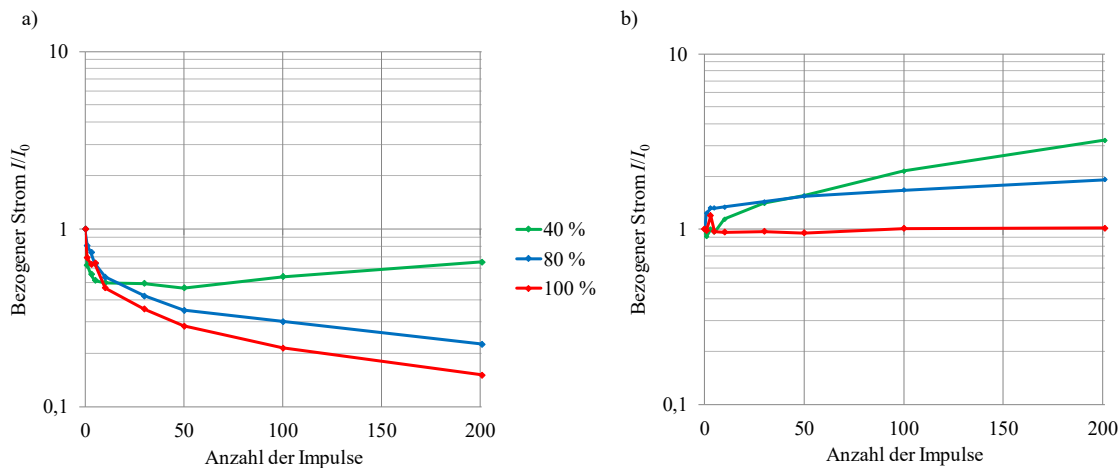


Abbildung 5.20: Degradation im Leckstrombereich, gemessen mit Gleichspannung a) in Richtung “forward”; b) in Richtung “reversed“ gemessen, bei einer Messreihe mit 58 J/cm^3 bei 115°C und $U_{\text{test}}^* = 0,8$ an einem Muster von Fabrikat 1. Die Untersuchung zeigt die Degradation verursacht durch die ersten Impulsenergieeinträge.

Die *Abbildung 5.21* zeigt die Ergebnisse für die durchgeführten Impulsspannungsmessungen bei festen Stromamplituden der Form $8/20 \mu\text{s}$ im Durchbruchbereich. Auch in dieser Grafik stimmt die Farbgebung mit den vorherigen Darstellungen dieses Bereiches überein (grün: 1 kA, schwarz: 5 kA und rot: 10 kA). Sowohl in Richtung “forward“ (Grafik a) als auch in Richtung “reversal“ (Grafik b) führt ein erster Impulsenergieeintrag zu einer Absenkung der Spannung bei konstanten Stromamplituden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass ein Stromimpuls der Form $8/20 \mu\text{s}$ bei einer Amplitude von 10 kA bei dem hier verwendeten Varistor einem Energieeintrag von 96 J/cm^3 entspricht. Der aufgrund der Messung verursachte Energieeintrag ist damit höher, als derjenige durch die Belastung innerhalb des Dauerversuches, und er wird innerhalb der Zwischenmessungen mit beiden Polaritäten auf den Varistor gegeben. Das hat zur Folge, dass sich insbesondere nach einigen wenigen Impulsenergieeinträgen aus der Versuchsreihe die Messung selbst stärker auf die Kennlinie auswirkt, als der Versuch an sich. Diese Annahme bestätigt sich im weiteren Verlauf der Ergebnisse in *Abbildung 5.21*, in der sich die anfängliche Absenkung während der nachfolgenden Energieeinträge relativiert. Auch die Tatsache, dass eine klare Tendenz der Spannungsveränderungen nach 50 Impulsen noch nicht zu erkennen ist, spricht für den großen Einfluss der Zwischenmessung. Die Aussagekraft der Messergebnisse für den Durchbruchbereich ist daher nicht für eine ernsthafte Interpretation nutzbar und somit auch während der Zwischenmessungen innerhalb der regulären Dauerversuche nicht gewinnbringend.

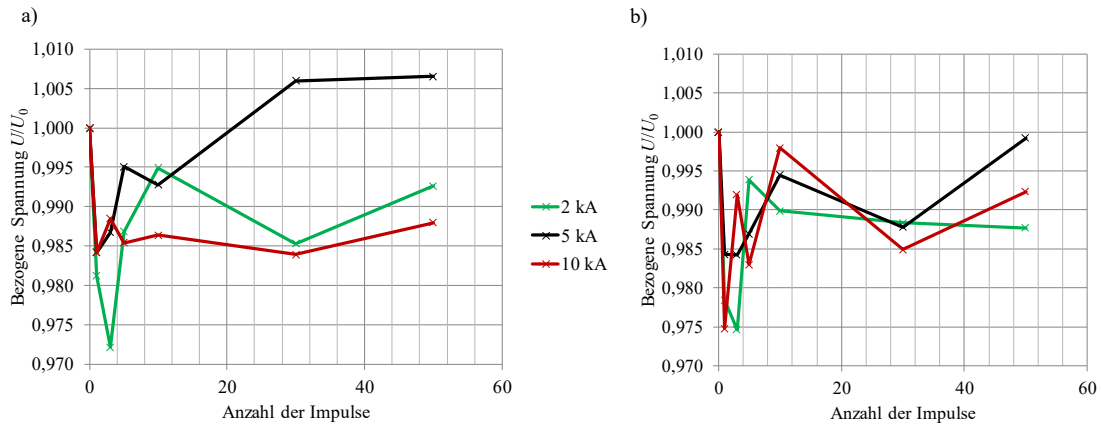


Abbildung 5.21: Degradation im Leckstrombereich, gemessen mit Impulsströmen der Form $8/20\mu\text{s}$; a) in Richtung “forward”; b) in Richtung “reversed“ gemessen, bei einer Messreihe mit 58 J/cm^3 bei 115°C und $U_{\text{test}}^* = 0,8$ an einem Muster von Fabrikat 1. Die Untersuchung zeigt die Degradation verursacht durch die ersten Impulsenergieeinträge.

Diese Untersuchung zeigt außerdem, dass die ersten Impulsenergieeinträge innerhalb der Versuche zu den stärksten Veränderungen im sehr sensitiven Leckstrombereich der E - J -Charakteristik führen und im weiteren Verlauf, wie in den bereits gezeigten Messreihen mit über 10 000 Impulsenergieeinträgen zu sehen, tendenziell in eine Sättigung laufen. Diese und die Untersuchung zu der variablen Energiedichte der Stromimpulse (*Kapitel 5.3.3*) lässt darauf schließen, dass es im Falle von der Verwendung der Varistoren bis zu einer Energiedichte von einschließlich 55 J/cm^3 ausreicht, Messreihen mit Belastungen bis zu einer Anzahl von 2 800 Impulsenergieeinträgen durchzuführen. Mit den hier erzielten Ergebnissen gilt dies für höhere Energiedichten nicht, da sich hier auch im Anschluss an 2 800 Impulse noch gravierende Änderungen bis hin zu einem Ausfall bei 210 J/cm^3 ergeben haben. Die benannte Grenze könnte sich jedoch insofern noch zu höheren Werten hin verschieben, als dass es in diesen Untersuchungen zum Einsatz besonders dünner Varistorscheiben gekommen ist, die wesentlich anfälliger für kleine Materialschäden sein könnten, die sich im Extremfall, wie bei sehr hohen Impulsenergieeinträgen, schnell gravierender auswirken können. Dies würde vermutlich bei einem Einsatz von höheren Blöcken entsprechend abgeschwächt werden.

6 Fazit und Ausblick

Für die Bewertung der Einsatzfähigkeit von MO-Varistoren als energieabsorbierendes Element in Gleichstromleistungsschaltern wurde im Verlauf dieser Arbeit eine vorher so noch nicht realisierte Versuchseinrichtung entwickelt und aufgebaut, die die Belastungen der Varistoren während eines Schaltvorgangs in einem Gleichstromschalter nachbildet. Der Zielsetzung folgend, möglichst viele Varistoren zu belasten, und aufgrund der Art der Belastung (Kombination aus Impuls- und permanent anliegender Gleichspannung) wurde der Aufbau so klein wie möglich bemessen. Da grundsätzlich davon ausgegangen werden kann, dass das Verhalten einzelner Varistorscheiben auf Reihenschaltungen von Varistoren übertragbar ist, kann mit Spannungen von nur bis zu 10 kV gearbeitet werden. Die Übertragung der Ergebnisse auf Reihen- und Parallelschaltungen einzelner Varistoren ist grundsätzlich möglich. Zudem fand eine Definition der unterschiedlichen Prüfanforderungen, die für die Durchführung einer systematischen Untersuchung notwendiger Weise eingehalten werden müssen, statt. Es erfolgten Untersuchungen an Varistoren fünf verschiedener Hersteller in Form diverser Versuchsreihen mit variierenden Parametern, die zusammenfassend hier vorgestellt wurden. Aus den vorgestellten Untersuchungen lassen sich erstmals allgemeine sowie auch bereits einige konkrete Aussagen bezüglich der Einsatzfähigkeit der derzeit kommerziell erhältlichen MO-Varistoren in Gleichstromleistungsschaltern ableiten. Zusätzlich kann von den Erkenntnissen insofern profitiert werden, als sich aus den Resultaten der Versuchsreihen erste Aspekte, die für die Definition von zukünftigen Prüfungen berücksichtigt werden sollten, ergeben. Da davon auszugehen ist, dass aufgrund der hier durchgeführten Belastungen die bereits bekannten und in der Literatur beschriebenen Alterungsmechanismen im Material ablaufen, war es nicht Ziel dieser Arbeit, ein neues Modell hierzu zu erarbeiten, sondern vielmehr die Gestaltung eines Prüf Szenarios voranzutreiben, sowie die Kenntnis der Ausprägung der Degradation der Varistoren verschiedener Hersteller zu sondieren. Letzteres führt, unter Berücksichtigung von Grenzwerten aus der bestehenden Normung für MO-Varistoren, unmittelbar zu einer konkreten Aussage bezüglich deren Tauglichkeit für den Einsatz in einem Gleichstromschalter. Die Einsatzfähigkeit wird in den bislang veröffentlichten Gleichstromschalterkonzepten als gegeben vorausgesetzt. Dies ist allerdings nicht möglich, da es sich um eine vollkommen neue Belastung handelt, die in dieser Form im Bezug auf MO-Varistoren noch nicht betrachtet wurde. Die Untersuchungen von [Tuc2014]

zeigen, dass sich die Stromform maßgeblich auf die Belastbarkeit der Varistoren auswirken kann, weshalb die Auswirkungen neuartiger Impulsformen immer zu untersuchen sind.

Das Ergebnis der hier dokumentierten Untersuchung zeigt, dass grundsätzlich Varistoren erhältlich sind, welche dazu in der Lage sind, den Belastungen während des Betriebes innerhalb eines Gleichstromschalters stand zu halten. Dies traf in den durchgeführten Versuchsreihen grundsätzlich auf MO-Varistoren von zwei der betrachteten sieben Fabrikate zu. Bei dreien der untersuchten Fabrikate handelt es sich um als nicht gleichstromstabil spezifizierte Varistoren. Im Fall eines weiteren lag hierzu keine Angabe vor. Wie es für Hersteller A gezeigt wurde, ist es durchaus möglich, dass ein als gleichstromstabil spezifizierter Varistor des gleichen Herstellers für die Anwendung geeignet sein kann. Bekanntermaßen nicht gleichstromstabile MO-Varistoren erfahren aufgrund der eingepprägten Impulsstrombelastungen eine Degradation im Leckstrombereich der E - J -Charakteristik, die der des gleichstromstabilen Materials ähnelt. Die Veränderungen im Durchbruchbereich überschreiten allerdings die von [IEC60099-4] angegebene Grenze von $\pm 5\%$ deutlich, was für den Einsatz in einem Gleichstromschalter nicht tolerabel ist. Wird ein solcher Varistor zusätzlich mit einer permanenten Gleichspannung beansprucht, was ein Worst-Case-Szenario darstellt, erhöht sich die Degradation beider Bereiche (im Durchbruchbereich auf bis zu 22% Anstieg der Restspannung bei einem Impulsstrom der Amplitude 10 kA und der Form 8/20 μ s). Bei einer Erhöhung der Restspannung des Varistors kann der spezifizierte Schutzpegel schnell überschritten werden. In der Folge kann es zu einer Zerstörung des Schalters kommen. Daher ist eine Erhöhung der Spannung im Durchbruchbereich in diesem Ausmaß nicht tolerabel. Unabhängig von dem verwendeten Material kam es im Verlauf der Dauerbelastung zu einer Erhöhung des Stromes im unteren Leckstrombereich. Dies ist im Allgemeinen nicht als kritisch anzusehen, da in einem gängigen Gleichstromschalterkonzept, aufgrund des vorgelagerten Trennschalters, keine permanente Spannung anliegt, weshalb hier die thermische Stabilität nicht in Mitleidenschaft gezogen wird. In diesem Fall fände eine Auslegung des Varistors statt, die bei anliegender Betriebsspannung eine Belastung des Varistors mit 80% der für den Varistor vorgesehenen Referenzspannung entspricht. Diese Spannung liegt innerhalb eines Bereiches, der nur geringe Stromänderungen erfährt, und ist daher ebenfalls als unkritisch zu beurteilen. Gleiches gilt für Varistoren, die in Gleichstromschaltern betrieben werden, die auch nach Öffnen eines Trennschalters weiterhin mit einer Gleichspannung belastet werden, wie in [WM2015] beschrieben. Grundsätzlich ist der Leckstrombereich der E - J -Charakteristik wesentlich sensitiver für die durchgeführten Belastungen als der Durchbruchbereich, was auch aus der Literatur bekannt ist [KLN1999]. Für den Einsatz in einem Gleichstromschalter spielt im Allgemeinen jedoch der Durchbruchbereich mit der Restspannung die wesentlichere Rolle. [Tuc2014] und [Cig2017] zeigen bei

Untersuchungen zu den Auswirkungen von Vorbelastungen unterschiedlicher Stromform auf das Energieaufnahmevermögen ebenfalls, dass es z. T. zu gravierenden Veränderungen der charakteristischen Spannung (ähnlich der Referenzspannung) im Leckstrombereich kommt. Diese Veränderung steht aber in keinem Verhältnis zu dem ermittelten Energieaufnahmevermögen der MO-Varistoren. Laut [Cig2017] ist durch den Test für die Bestimmung des wiederholten Ladungstransfers (Q_{rs} -Test) der [IEC60099-4] eine Absicherung in der Norm enthalten, um sicher zu stellen, dass die Änderung der Charakteristik und damit die Folgen für das thermische Energieaufnahmevermögen tolerabel sind. Auch in [Cig2013] wird von dem Einfluss auf den Leckstrombereich berichtet. Allerdings wird in der genannten Literatur ausschließlich ein einzelner Punkt auf der Charakteristik dokumentiert. Insofern ergänzen die Ergebnisse dieser Arbeit die Erkenntnisse aus der Literatur.

Auch ein Betrieb bei wechselnder Polarität ist grundsätzlich möglich und scheint sich, ähnlich wie es die Erfahrungen aus der Alterungsprüfung bei einer Gleichspannungsbelastung mit regelmäßigem Polaritätswechseln zeigen, günstig auf das Alterungsverhalten auszuwirken. Auch dieses Ergebnis findet sich in [Tuc2014] und [Cig2017] wieder.

Im Rahmen der durchgeführten Dauerbelastungen hat sich für Varistoren einzelner Hersteller bereits nach wenigen Energieeinträgen bei etwa 70 % der laut Datenblatt anzunehmenden Energieaufnahmefähigkeit pro Impuls die Metallisierung der MO-Varistoren als ein wesentlicher Schwachpunkt herauskristallisiert. Hierbei kommt es mutmaßlich insbesondere auf das Verfahren an, welches zu dessen Aufbringung auf dem ZnO-Block zum Einsatz kommt. Eine aufgespritzte Metallisierung erscheint nach den Untersuchungen als wesentlich fehlerunanfälliger als eine solche, die durch ein Druckverfahren aufgebracht wird. Letzteres führt wahrscheinlich, aufgrund der Oberflächenrauigkeit des ZnO-Blocks, zu Lufteinschlüssen zwischen ZnO und Metallisierung. Aufgrund der wiederholten Impulsstrombelastungen kann es an den Fehlstellen infolge der Konzentration des Stromes auf wenige Strompfade zu dauerhaften Schädigungen der Keramik kommen. Diese führen möglicherweise zu einer Beschädigung des Materials, bis es zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Spannungsfestigkeit und damit letztlich zu einem Durchschlag durch das Varistormaterial kommt. Somit kann ein Ausfall der Varistoren jedoch nicht auf eine Materialermüdung zurück geführt werden. Sie könnte gegebenenfalls durch die Nutzung eines anderen Verfahrens zur Aufbringung der Metallisierung auf den Varistorblock zu vermeiden sein. Dies bestätigt sich aus den erzielten Resultaten mit den Varistoren von Hersteller B, die im Nachhinein zur Verbesserung des Kontaktes mit einer zusätzlichen Elektrode versehen wurden und somit Versuchen mit einer Impulsstromenergiedichte von 55 J/cm^3 (50 % der Nennenergie) ohne weitere Auffälligkeiten stand hielten. Die gleiche Problematik ergab sich für Varistoren des Herstellers E, wobei hier eine Optimierung der Kontaktierung fehl schlug. Für Prüfungen,

die der Beurteilung der Einsatzfähigkeit der Varistoren dienen, muss daher auch dringend darauf geachtet werden, dass sich auf der Metallisierung der Varistoren keine umfangreichen Beschädigungen ergeben.

Erstmals können aus der vorliegenden Arbeit Prüfbedingungen für Varistoren zum Einsatz in Gleichstromschaltern abgeleitet werden. Die Ergebnisse aus den Parameterstudien zeigen, dass eine Prüftemperatur von 115 °C basierend auf den untersuchten Temperaturen ein Optimum darstellt. Dies ist daran festzumachen, dass bei niedrigeren Temperaturen geringere Degradationen zu beobachten sind. Höhere Temperaturen scheinen dagegen insbesondere für die Untersuchungen im Leckstrombereich bereits zu einem leichten Erholungseffekt des Materials zu führen. Auch für die permanent anliegende Gleichspannungsbelastung der MO-Varistoren ergeben sich interessante Schlussfolgerungen. Die Beeinflussung der Degradation durch die Gleichspannungsbelastung verstärkt sich mit ihrer Höhe. Allerdings ist eine Prüfung bei einer Auslegung über die üblichen 80 % der Referenzspannung hinaus nicht vorteilhaft. Diese Steigerung führt nicht zu einer Beschleunigung der Degradationsvorgänge, sondern vielmehr zu einer wesentlichen Verstärkung.

Ein weiterer Gesichtspunkt ergab sich aus den Untersuchungen zum Energieeintrag während des Stromimpulses. Hier fanden Versuche mit Material des Herstellers A statt. Sie ergaben, dass grundsätzlich auch eine Belastung mit bis zu 210 J/cm³ (100 % der Nennenergie) möglich ist. Allerdings lassen die Ergebnisse der Untersuchung bei 110 und 210 J/cm³ eine Verhaltensänderung in der Degradation erkennen. Unter anderem steigt die Restspannung mitunter um etwa 8 % an. Grundsätzlich könnten zwei Aspekte zum Tragen kommen. Zum einen wirken sich möglicherweise die höheren Energiedichten sowie die stärkeren Stromanstiege anders aus, als bei den vorherigen Untersuchungen mit niedrigeren Werten. Zum anderen könnte auch die sehr geringe Höhe der Varistorscheiben von knapp 3 mm, die für die Untersuchungen der hohen Energiedichten zum Einsatz kamen, eine Rolle spielen. Die Herstellung sehr dünner Varistoren birgt das Risiko, dass sich kleine Schäden oder Fehlstellen im Material gravierender auf das elektrische Verhalten auswirken als dies bei höheren der Fall ist. Daher ist es durchaus möglich, dass sich bei Varistoren größerer Höhe die Restspannung nicht in diesem Ausmaß ändert. Das bestätigen auch [Tuc2014] und [Cig2013] sowie [Cig2017], wo es auch bei Impulsbelastungen höheren Energieinhalts zu keinen nennenswerten Änderungen im Bereich der Restspannung kommt. Einschränkend muss allerdings erwähnt werden, dass im Rahmen der Untersuchungen dort Messreihen mit nur 20 Impulsbelastungen an größeren Varistoren (Mindesthöhe von 30 mm und Minstdurchmesser von 40 mm) durchgeführt wurden. Ein direkter Vergleich ist daher schwierig. Das Ergebnis dieser besonders dünnen Scheiben ist offenbar nicht unmittelbar auf höhere Varistoren übertragbar. Um eine Aussage zu den hier präsentierten Ergebnissen treffen zu

können, ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit von Untersuchungen mit den genannten Energiedichten an MO-Varistoren größerer Höhe in einer dafür ausgelegten Versuchseinrichtung. Diese Ergebnisse brächten Gewissheit für die bislang aufgestellten Vermutungen. Ein entsprechender Versuchsaufbau war im Rahmen dieser Arbeit nicht realisierbar, da dies den Rahmen der Arbeit gesprengt hätte.

Zukünftige Prüfungen dieser Art sollten daher zunächst bei Umgebungstemperaturen von 115 °C, wie es bei der beschleunigten Alterungsprüfung praktiziert wird, mit einer permanent anliegenden Gleichspannung von 80 % der Referenzspannung und mit einer Impulsstromenergiedichte von bis zu 210 J/cm³ an höheren MO-Varistoren durchgeführt werden.

Die Ergebnisse, insbesondere die Veränderungen der Spannung im Durchbruchbereich, zeigen, dass die durchgeführten Untersuchungen zwingend als Qualifizierungsprüfung durchzuführen sind, um einen sicheren Einsatz des jeweiligen MO-Varistor-Typs garantieren zu können. Dabei kann wahrscheinlich auch mit Versuchsreihen einer geringeren Anzahl an Impulsenergieeinträgen die Tauglichkeit der Varistoren für den Einsatz in einem Gleichstromleistungsschalter ausreichend geprüft werden. Dies liegt nahe, da sich nach einem Eintrag erster Impulsströme unmittelbar große Veränderungen in der E - J -Charakteristik ergeben, während nachfolgende (nach mehr als 2 800 Impulsen) nicht mehr diesen Effekt erzielen, sondern vielmehr eine Sättigung der Veränderungen auftritt. Dies trifft bislang lediglich auf Versuchsreihen mit einer Impulsstromenergiedichte von bis zu 55 J/cm³ zu. Allerdings könnte das auch in diesem Fall daran liegen, dass die Versuche mit höheren Energiedichten mit den MO-Varistoren geringerer Bauhöhe stattgefunden haben. Von einer stärkeren Beeinflussung erster Energieeinträge berichtet auch [Tuc2014]. Diese Erkenntnis führt für den Fall ihrer Bestätigung zu einer gravierenden Zeitersparnis. Ebenso interessant wären Untersuchungen zur Beeinflussung der Degradation durch die Stromsteilheit und Amplitude der Impulsstrombelastungen, welche aus Zeitgründen im Verlauf dieser Arbeit nicht als systematische Versuchsreihen durchgeführt werden konnten. Diese könnten bereits erste Aufschlüsse darüber bringen, inwiefern das geänderte Verhalten bei höheren Energiedichten durch die Abmessungen der Varistoren oder durch die Parameter des Impulses entstehen.

Anhang

A Zusatzinformationen zur Berechnung der Messunsicherheit

Die genaue Definition der Messunsicherheit lautet wie folgt:

“Kennwert der aus Messungen gewonnen wird und zusammen mit dem Messergebnis zur Kennzeichnung eines Wertebereiches für den wahren Wert der Messgröße dient“

und weiter in einer Anmerkung:

“Ein Maß für die Genauigkeit der Messung und kennzeichnet die Streuung oder den Bereich derjenigen Werte, die der Messgröße vernünftiger Weise als Schätzwerte für den wahren Wert zugewiesen werden können.“

Die Ursache für Abweichungen der Messergebnisse von dem wahren Wert können verschiedene Ursachen haben. Sie setzt sich aus bekannten und unbekannten Abweichungen zusammen. Hierzu gehören:

- Unvollkommenheit der Messgeräte
- Einflüsse wie Eigenerwärmung, Abnutzung und Alterung der Messgeräte oder des Normals⁴².
- Rückwirkungen bei Erfassung der Messgröße durch das Messgerät
- Durch den Erfasser verursachte Abweichungen, z.B. durch unkorrektes Ablesen der Messwerte
- Bei der Verwendung von Beziehungen mehrerer Größen zur Bestimmung der gesuchten Größe werden nicht alle Einflüsse berücksichtigt
- Äußere Einflüsse wie Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte etc.

⁴² Ein Normal ist laut Norm ein Messgerät, -einrichtung oder Referenzmaterial, um eine Einheit oder mehrere bekannte Werte von Größen darzustellen, zu bewahren oder zu reproduzieren, um diese an andere Messgeräte durch Vergleich weiter zu geben.

Die Messunsicherheit unterteilt sich in systematische Abweichungen, die bei gleichbleibenden Randbedingungen zu einem unveränderten Messergebnis führen und zufällige Messunsicherheiten, die sich bei der Wiederholung der Messung ändern. Erstere lassen sich nicht durch wiederholte Messungen erkennen. Sie lassen sich wiederum in bekannte und unbekannte systematische Abweichungen gliedern. Bekannt sind beispielsweise Abweichungen, die sich bei Kalibrierung eines Messgerätes ergeben und somit im Anschluss an die Messung rechnerisch korrigiert werden können. Als unbekannt gelten Abweichungen, die sich z.B. durch die Alterung des gesamten Aufbaus ergeben bzw. die sich nur mit erheblichem Aufwand ermitteln lassen. Es ist zu beachten, dass sich die Abweichungen einzelner Komponenten von Messeinrichtungen bis es zu der Ermittlung des Endergebnisses kommt, fortpflanzen. Aufgrund dessen, dass die Beiträge verschiedener Komponenten zu berücksichtigen sind, welche mit verschiedenen Vorzeichen versehen sein können, ist es möglich, dass die Abweichung des Endergebnisses geringer ausfällt als die einzelner Komponenten.

Zufällige Abweichungen sind nicht beeinflussbar. Sie führen zu einer Streuung der Messergebnisse bei einer Wiederholung der Messung unter gleichen Rahmenbedingungen. Aufgrund der Streuung der Ergebnisse ergibt sich eine Verteilungsfunktion, die diese Werte enthält und eine Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass sich das Ergebnis innerhalb dieser Verteilung befindet. In den meisten Fällen sind Erwartungswert sowie Varianz hinreichende Angaben für die Charakterisierung der zufälligen Abweichung. Der Erwartungswert (μ) stellt hierbei den Mittelwert der Verteilung dar. Es werden N Elemente x_i berücksichtigt. Üblicherweise beeinflussen mehrere Größen das Messergebnis, weshalb in der Messtechnik oft mit einer Normalverteilung der Messergebnisse gerechnet werden kann. In diesem Fall streuen die tatsächlich gemessenen Werte symmetrisch um den Erwartungswert. Sollte die tatsächliche Verteilung einer Messgröße nicht bekannt sein, ist es möglich eine Normalverteilung zu verwenden.

Auch diese Abweichungen pflanzen sich bis zur Ermittlung des endgültigen Ergebnisses fort. Grundsätzlich ist eine Worst-Case Betrachtung möglich. Sinnvoller ist es, davon auszugehen, dass nicht für jedes enthaltene Element die größte Toleranz zutrifft. Für diesen Fall erfolgt eine statistische Kombination der einzelnen Beiträge zum Endergebnis. In der Regel ist die Anwendung des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes möglich. Für die Schätzwerte von Mittelwert \bar{y} und Varianz s_y^2 einer Stichprobe ergeben sich *Gleichungen A.1* und *A.2*.

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) \quad (\text{A.1})$$

$$s_y^2 = \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \right)^2 \cdot s_k^2 \right) \quad (\text{A.2})$$

Exponentialstoßstromkreis

Wie bereits im Hauptteil erwähnt, ist der Exponentialstoßstromkreis nicht dafür ausgelegt, einen exakten Stromwert für den Impuls festzulegen. Stattdessen sind die Ladespannung der Kondensatoren und die Schlagweite der Funkenstrecke wählbar. Auf diese Weise ist es nahezu unmöglich, einen gewünschten Stromwert zu erzielen. Da als Referenz für die Veränderung der E - J -Charakteristik der Spannungswert, der sich bei einem $8/20\text{ }\mu\text{s}$ -Impuls und einer Amplitude von 10 kA einstellt, dient, findet für dessen Ermittlung eine lineare Approximation aus zwei gemessenen Werten statt. Hierfür ergibt sich die nachfolgende Gleichung, wobei y die Spannungs- und x die Stromwerte repräsentieren.

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + y_2 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_2 \quad (\text{A.3})$$

Um nach Gauß die Fehlerfortpflanzung berechnen zu können, ist die *Gleichung 4.1* partiell jeweils nach x_1 ; x_2 ; y_1 und y_2 abzuleiten.

$$\frac{\delta y}{\delta x_1} = \frac{y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)^2} \cdot x - \frac{y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)^2} \cdot x_2 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\delta y}{\delta y_1} = \frac{-1}{(x_2 - x_1)} \cdot x - \frac{1}{(x_2 - x_1)} \cdot x_2 \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\delta y}{\delta x_2} = \frac{-y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)^2} \cdot x - \left(\frac{-y_2 - y_1}{(x_2 - x_1)^2} \cdot x_2 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\delta y}{\delta y_2} = \frac{-1}{(x_2 - x_1)} \cdot x + 1 - \frac{1}{(x_2 - x_1)} \cdot x_2 \quad (\text{A.7})$$

In die Ergebnisse der partiellen Ableitungen werden die Schätzwerte der jeweiligen Erwartungswerte der Parameter eingesetzt, wodurch sich ein Wert für den Term $\frac{\delta f}{\delta x_k}$ ergibt, der in *Gleichung A.2* einzusetzen ist, um eine Gesamtunsicherheit zu berechnen. Es ergeben sich die in *Tabelle A.1* aufgeführten Werte.

Zusätzlich sind die Angaben zu den jeweiligen Vertrauensbereichen notwendig für die Berechnung. Über eine Stichprobe an Messungen lassen sich ein Schätzwert des Erwartungswertes sowie eine Stichprobenvarianz nach den aufgeführten Gleichungen berechnen. Für ein Vertrauensniveau von den in der Messtechnik üblichen 95 % ergeben sich für die betrachteten Parameter mit der nachstehenden Gleichung

$$\bar{x} \pm \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (\text{A.8})$$

A Zusatzinformationen zur Berechnung der Messunsicherheit

mit $t = 3,18$ die Vertrauensbereiche⁴³. Sie sind in *Tabelle A.1* aufgelistet.

Tabelle A.1: Übersicht der Schätzwerte für die Erwartungswerte sowie der berechneten Einzelbeiträge der mit Messunsicherheiten behafteten Parameter, die für die Berechnung der Gesamtunsicherheit nach Gauß benötigt werden

Parameter	Erwartungswert μ	Vertrauensbereich s_k	$\frac{\delta f}{\delta x_k}$
x_1	4 961 A	$\pm 69,7$ A	$2,89 \cdot 10^{-3}$ A
y_1	2 051 V	$\pm 23,9$ V	$9,91 \cdot 10^{-4}$ V/A
x_2	10 005 A	$\pm 14,63$ A	$2,96 \cdot 10^{-5}$ A
y_2	2 239 V	$\pm 10,83$ V	0,99 V/A

⁴³ Die Konstante t ist abhängig von der Überschreitungswahrscheinlichkeit sowie dem Stichprobenumfang n und kann Tabellen entnommen werden, [Mue2017].

B Zusatzinformationen zu den verwendeten Versuchseinrichtungen

Nachfolgend sollen insbesondere die technischen Daten der verwendeten Messmittel tabellarisch aufgelistet und zusätzliche Details zu den einzelnen Versuchsaufbauten erwähnt werden. Dies dient dazu sich ein besseres Bild von der Funktionsweise der Versuchstechnik machen zu können.

B.1 Dauerversuchsstand zur Nachbildung eines Gleichstromausschaltvorgangs

Diese Versuchseinrichtung entstand im Rahmen dieser Arbeit und wurde explizit für die Durchführung der Belastungen der MO-Varistoren aufgebaut. Das Prinzipschaltbild ist *Abbildung 4.1* zu entnehmen.

Technische Daten der Messmittel

Die Messung des Impulsstromes erfolgt mit einem Rogowskiwandler der Firma Power Electronics Measurement (die Daten hierzu sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen). Die Impulsspannungsmessung ist durch einen Tastkopf der Firma TESTEC realisiert, dessen Daten in *Tabelle B.3* aufgelistet sind. Die permanent anliegende Gleichspannung wird durch einen ohmschen Spannungsteiler und einen Shunt gemessen. Alle Daten werden an ein Oszilloskop (TDS 5034A *Tabelle B.2*) übermittelt und von diesem an den PC weitergeleitet. Hier findet eine Auswertung mit Hilfe der PC-Messkarte NI PCI 6221 (*Tabelle B.4*) statt. Während der Prüfungen lagern die MO-Varistoren in Temperaturschränke der Firma „Binder“, Typ „FED 115“ (*Tabelle B.6*). Zur Temperaturmessung kommt ein LWL-Messsystem zum Einsatz, die technischen Daten der Auswerteeinheit listet *Tabelle B.7* und die der verwendeten Temperatursensoren *Tabelle B.8* auf.

Tabelle B.1: Technische Daten des eingesetzten Rogowskistromwandlers für Messungen der Impulsströme im Dauerversuchsstand

Bezeichnung:	
Hersteller:	PEM (Power Electronic Measurements)
Typ:	CWT150
max. Stromscheitelwert:	30 kA
Übertragungsfaktor:	0,2 mV/A
untere Grenzfrequenz:	0,3 Hz
obere Grenzfrequenz:	16 MHz
Genauigkeit:	$\pm 1 \%$

Tabelle B.2: Technische Daten des Oszilloskops welches im Dauerversuchsstand eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Tektronix
Typ:	TDS5034A
Bandbreite:	300 MHz
max. Abtastrate pro Kanal:	2 GS/s
max. Aufzeichnungslänge:	1000000 Punkte
vertikale Auflösung:	12 bit
vertikale Genauigkeit:	$\pm 2 \%$
Eingangsimpedanz:	1 Ω , 12 pF oder 50 Ω

Tabelle B.3: Technische Daten des Tastkopfes, der im Dauerversuchskreis eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Testec
Typ:	PHV4002-3-RO
Nennblitzstoßspannung:	40 kV
Maßstabsfaktor:	1000
Messunsicherheit Spannung:	2 %

Tabelle B.4: Technische Daten der PC-Messkarte, die im Dauerversuchs-, Gleichspannungsmess- und Doppelsexponentialstoßstromkreis verwendet wird

Bezeichnung	
Hersteller:	NI (National Instruments)
Typ:	PCI NI 6221
ADC Auflösung:	16 bit
max. Abtastrate:	250 kS/s
max. Eingangsspannung:	± 10 V
max. Ausgangsspannung:	± 10 V
max. Ausgangsstrom:	± 5 mA
Eingangsimpedanz:	>10 G Ω , 100 pF
Ausgangswiderstand:	$\pm 0,2$ Ω
absolute Genauigkeit (bei U_{\max}):	3,1 mV

Tabelle B.5: Technische Daten der SIEMENS Logo, die den Dauerversuch steuert

Bezeichnung	
Hersteller:	SIEMENS
Typ:	LOGO! DM16 230 R
Versorgungsspannung:	230 V
Digitalausgänge:	8
Erweiterbar:	ja

Tabelle B.6: Technische Daten des Ofens, der im Dauerversuchs- und im Gleichspannungsmesssystem verwendet wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Binder
Typ:	FD115
Genauigkeit:	1,8 K
Auflösung:	1 K
Maximale Temperatur:	300 °C

Tabelle B.7: Technische Daten des Temperaturmesssystems, das im Alterungsprüfsystem verwendet wird

Bezeichnung	
Hersteller:	FISO Technologies
Typ:	TMI 4
Genauigkeit:	0,025 % des Endwertes
Auflösung:	0,01 % des Endwertes
Abtastrate:	20 Hz
Schaltzeit zwischen zwei Kanälen:	150 ms
Ausgangsspannung:	± 5 V

Tabelle B.8: Technische Daten des im Alterungsprüfsystem verwendeten Temperatursensors.

Bezeichnung	
Hersteller:	FISO Technologies
Typ:	FOT-L-SD
Messbereich:	-40...+300 °C
Genauigkeit:	0,1 °C
Auflösung:	0,1 K
Antwortzeit:	$\leq 1,5$ s

Steuerung

Die Steuerung während des Dauerversuches übernimmt eine Speicherprogrammierbare Steuerung von Siemens (SPS). Sie basiert auf einer Programmierung durch die Verknüpfung von Logikbausteinen. Die SPS ermöglicht eine vom PC unabhängige Steuerung der dreizehn im Kreis vorhandenen pneumatischen Schalter. Hierzu zählen neben dem Hauptschalter für das Zuschalten des Impulskondensators in den Impulsstrompfad die Sekundärschalter, die festlegen, auf welchen MO-Varistor sich der Kondensator entlädt. Die Einhaltung der richtigen Schaltreihenfolge ist von zentraler Bedeutung. Dies liegt in dem bereits erwähnten Parallelwiderstand zu den Varistoren begründet, welcher den Impulsstrom zum Ende des Impulses hin übernimmt. Ist der Sekundärschalter nicht geschlossen, bevor der Hauptschalter schließt, entlädt sich der Kondensator vollständig über den Parallelwiderstand R_k in *Abbildung 4.1*. Da der Widerstand lediglich einen Wert von $7\ \Omega$ aufweist, ergäbe sich

dort ein entsprechend hoher Strom. Diesen zu führen, ist der Widerstand nur wenige Male infolge in der Lage. Um eine häufigere Belastung zu verhindern, sorgt die SPS dafür, dass sich der Sekundärschalter immer 1 s vor dem Hauptschalter schließt und im Anschluss 1 s länger geschlossen bleibt, so dass sich der Hauptschalter sicher bereits wieder geöffnet hat, bevor der Sekundärschalter öffnet. Dieses Prozedere wiederholt sich für jeden der zwölf vorhandenen Varistoren. Im Anschluss an die Belastung des zwölften MO-Varistors beginnt die Steuerung erneut mit der Belastung des ersten. Die SPS steuert die pneumatischen Schalter über das Ansteuern pneumatischer Ventile, die ihrerseits das Schließen bzw. Öffnen der Schalter veranlassen. Im Falle eines Ausfalls der SPS oder der Druckluft fahren die Schalter in den geöffneten Zustand und verbleiben dort.

B.2 Doppel exponentialstoßstromkreis

In *Abbildung B.1* ist das vereinfachte Ersatzschaltbild des Prüfkreises dargestellt. Die Vereinfachung der Darstellung besteht in der Abbildung nur eines von acht nutzbaren Parallelpfaden, die für die Erzeugung des Impulsstromes zur Verfügung stehen. Jeder Pfad besteht aus einem Kondensator (von $2\ \mu\text{F}$) und einer hierzu in Reihe angeordneten Kombination aus einer Induktivität und einem Widerstand. Die Impedanz dieser beiden Elemente legt die Impulsstromform⁴⁴ fest. Die Parallelpfade sind oberhalb der Funkenstrecke, welche durch ihre Zündung die Entladung aller Kondensatoren über den MO-Varistor initiiert, verbunden. Der MO-Varistor lagert auf Grund seiner geringen Höhe und damit verbundenen niedrigen Beständigkeit gegenüber hohen Drücken, nicht in der im Kreis vorgesehenen Aufnahme. Diese verspannt den Varistor pneumatisch mit einer Kraft von $3\ \text{N}/\text{mm}^2$. Für Varistoren von wenigen Millimetern Höhe bietet sich daher eine Fixierung mittels einer geringeren Gewichtskraft an. Sie wird auch in diesem Fall durch die Gewichtskraft eines massiven Messingblocks gewährleistet. Die Messung des durch den Varistor fließenden Stromes erfolgt mit Hilfe eines Rogowskiwandlers (Power Electronic Measurements CWT150). Ein Differentialtastkopf (Testec TT-SI 9010A) erfasst die Spannung. Ein Oszilloskop (Tektronix TDS3034) nimmt beide Verläufe auf und leitet die Daten an einen Rechner weiter, welcher sie mit Hilfe der Software LabView auswertet und archiviert. Die Berechnung der Maxima von Strom und Spannung beruhen auf einer Mittlung der Messwerte, die sich zeitlich unmittelbar vor dem absoluten gemessenen Maximum und unmittelbar im Anschluss daran ergeben haben. Für das Strommaximum berücksichtigt die Software 2 % der Gesamtaufzeichnungsdauer im Fall des Spannungsmaximums ergeben

⁴⁴ sowohl Anstiegs- als auch Rückenhalbwertszeit

sich geringere zeitliche Änderungen, sodass 4 % der Gesamtaufzeichnungsdauer berücksichtigt werden. Diese Versuchseinrichtung wurde ursprünglich von der Firma HIGHVOLT installiert. Die Kennwerte der Impedanzen für die Erzeugung unterschiedlicher Stoßströme sind *Tabelle B.9* zu entnehmen.

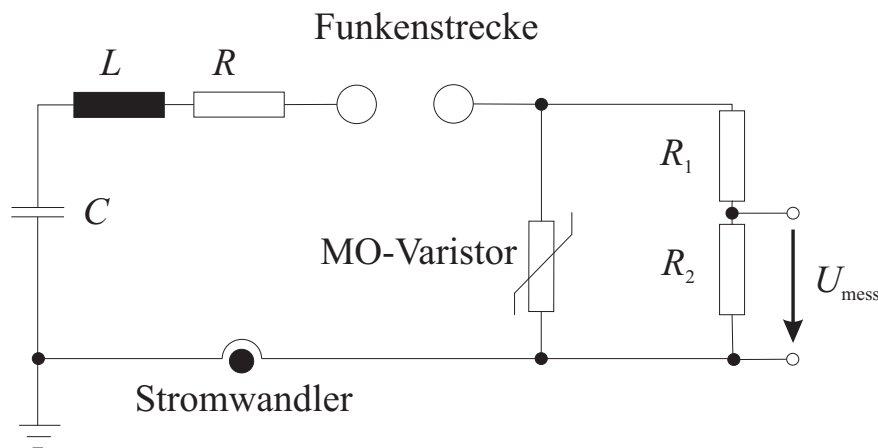


Abbildung B.1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Doppel exponentialstoßkreises mit C : Kondensator, L : Induktivität, R : Widerstand und V : Differentialtastkopf. Gezeigt ist nur einer von acht zuschaltbaren parallel liegenden und identisch aufgebauten Strompfaden für die Impulsstromerzeugung.

Tabelle B.9: Kennwerte der Induktivitäts-Widerstandskombination, die im Doppel exponentialstoßstromgenerator für die verschiedenen Stoßformen verwendet werden

Bezeichnung	Kurvenform	Anzahl paralleler Pfade	Induktivität	Widerstand
Steilstoßstrom:	$1 / < 20 \mu\text{s}$	5	$0,3 \mu\text{H}$	10Ω
Hochstoßstrom:	$4 / 10 \mu\text{s}$	8	$1,44 \mu\text{H}$	$\approx 0 \Omega$
Blitzstoßstrom:	$8 / 20 \mu\text{s}$	5	$32 \mu\text{H}$	$1,3 \Omega$
Schaltstoßstrom:	$30 / 60 \mu\text{s}$	2	$380 \mu\text{H}$	$2,1 \Omega$

Innerhalb des Versuchskreises erfolgt die Spannungsmessung mit Hilfe eines Differentialtastkopfes der Firma Testec (*Tabelle B.10*), dessen Daten der *Tabelle B.11* entnommen werden können. Der Strom wird mittels eines Rogowskiwandlers der Firma Power Electronic Measurements aufgenommen. Die Messdaten werden von einem Oszilloskop (*Tabelle B.12*) erfasst

und von einem PC ausgewertet und dokumentiert. Für die Ermittlung von Spannungs- und Strommaximum findet eine Wertemittelung statt wie sie bereits im Hauptteil beschrieben wurde. Hier fand auch bereits die Bestimmung der Messunsicherheiten statt. Die Steuerung und Aufladung der Kondensatoren des Kreises erfolgt durch kommerziell vertriebene Steuereinheiten bzw. Ladeeinrichtungen der Firma HIGHVOLT. Neben der Höhe der Ladespannung ermöglicht die Steuereinheit auch die gezielte Triggerung der Funkenstrecke.

Tabelle B.10: Technische Daten des Differentialastkopfes, der im Doppelexponentialstoßstromgenerator eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Testec
Typ:	TT-SI 9010A
Nennblitzstoßspannung:	7 kV
Maßstabsfaktor:	1000
Messunsicherheit Spannung:	2 %

Tabelle B.11: Technische Daten des eingesetzten Rogowskistromwandlers für Messungen mit Stromscheitelwerten ≥ 120 kA am Doppelexponentialstoßstromgenerator

Bezeichnung	
Hersteller:	PEM (Power Electronic Measurements)
Typ:	CWT1500
max. Stromscheitelwert:	300 kA
Übertragungsfaktor:	0,02 mV/A
untere Grenzfrequenz:	0,03 Hz
obere Grenzfrequenz:	16 MHz
Genauigkeit:	± 1 %

Tabelle B.12: Technische Daten des Oszilloskops welches im Rechteckimpuls- und Doppexponentialstoßstromgenerator eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Tektronix
Typ:	TDS3034
Bandbreite:	300 MHz
max. Abtastrate pro Kanal:	2,5 GS/s
max. Aufzeichnungslänge:	10000 Punkte
vertikale Auflösung:	9 bit
vertikale Genauigkeit:	$\pm 2\%$
max. Eingangsspannung:	150 V _{RMS}
Eingangsimpedanz:	1 $\mu\Omega$, 13 pF oder 50 Ω

Nach [IEC60099-4] ist keine Kompensation des induktiven Spannungsfalls notwendig, da dieser bei der Belastung eines metallischen Prüfkörpers $<2\%$ des Scheitelwertes der Spannung am zu prüfenden Objekt liegt.

B.3 Anordnung zur Bestimmung der Gleichstromcharakteristik

Im Rahmen der Zwischenmessungen erfolgt die Messung des unteren Gleichstrombereiches mit Hilfe dieser Versuchseinrichtung, deren Funktionsprinzip bereits in *Kapitel 4.2* genauer dargestellt wird.

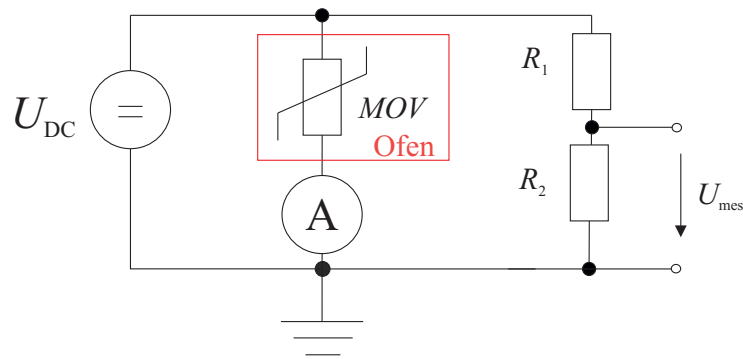


Abbildung B.2: Ersatzschaltbild des Gleichspannungskreises zur Charakterisierung der MO-Varistoren im Leckstrombereich, mit U_{DC} : Gleichspannungsquelle, MOV: MO-Varistor, A: Picoamperemter, R_1 : Hochspannungswiderstand des Spannungsteilers, R_2 : nieder Spannungswiderstand des Spannungsteilers und U_{mes} : gemessene Spannung.

Zusätzlich ist in *Abbildung B.2* das zugehörige Ersatzschaltbild zu sehen. Neben dem Einsatz einer Messkarte (PCI 6221, *Tabelle B.4*) und einem Umluftofen der Firma Binder *Tabelle B.6*, deren Daten bereits zuvor im Rahmen der Auflistung zu dem Dauerversuchskreis zusammengestellt sind, befinden sich ein Pico-Ampère-Meter (*Tabelle B.13*) der Firma Keithley sowie eine Gleichspannungsquelle der Firma fug (*Tabelle B.14*) im Aufbau. Ihre Daten werden nachfolgend aufgeführt. Das Pico-Ampère-Meter dient der Messung des fließenden Gleichstromes, die Spannungsquelle liefert, durch den PC gesteuert, die Gleichspannung. Beide Geräte senden die Messdaten an den PC, der diese auswertet und archiviert.

Tabelle B.13: Technische Daten des Pico-Ampère-Meters, das in der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gleichstromcharakteristik eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	Keithley
Strombereich:	fA...20 mA
Auflösung:	10 fA
Maximale Messunsicherheit Strom:	0,4 % bei 400 fA

Tabelle B.14: Technische Daten der Gleichspannungsquelle, die in der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Gleichstromcharakteristik eingesetzt wird

Bezeichnung	
Hersteller:	fug
Bezeichnung:	HCN 140-6500
Spannungsbereich:	0....6500 V
Strombereich:	0....20 mA
Auflösung:	1 V
Messunsicherheit Strom:	1,13 %

Literaturverzeichnis

- [ABB2011] ABB Switzerland LTD., Herausgeber. *Overvoltage protection, Metal oxide surge arresters in medium voltage systems*, 2011.
- [BCM1996] M. Bartkowiak, M. G. Comber und G. D. Mahan. *Energy handling capability of ZnO varistors*. In: Journal of Applied Physics, Band 79 (11) Seiten 8629-8633, (1996). issn: 0885-8977. doi: 10.1063\1.362484.
- [BCM2001] M. Bartkowiak, M. G. Comber und G. D. Mahan. *Influence of nonuniformity of ZnO varistors on their energy absorption capability*. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Band 16 (4), Seiten 591-598, 2001. issn: 0885-8977. doi: 10.1109\61.956742.
- [BGR1989] G. Blatter, F. Greuter, M. Rossinelli und F. Stucki *Conduction mechanism in ZnO-Varistors: an Overview*. In: Ceramic Transaction 1989.3 (1989).
- [BPS2018] N. A. Belda, C. Plet, R. Smeets und R. Nijman. *Full Power Short-circuit Tests of HVDC Circuit Breakers using AC Generators Operated at Reduced Power Frequency*. In: 47. Cigré Konferenz A3-115, Paris, Frankreich, 2018.
- [BT1995] Shr-Nan Bai und Tseung-Yuen Tseng. *Degradation Phenomena Due to Impulse-Current in Zinc Oxide Varistors*. In: Journal of the American Ceramic Society, Band 78 (10) 1995, Seiten 2685-2689. issn: 00027820. doi: 10.1111\j.1151-2916.1995.tb08041.x.
- [CBA2012] M. Callavik, A. Blomberg, J. Häfner und B. Jacobson. *The Hybrid HVDC Breaker. An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids*. ABB Switzerland LTD., 2012.
- [CGS1986] W. G. Carlson, T. K. Gupta und A. Sweetana. *A Procedure for Estimating the Lifetime of Gapless Metal Oxide Surge Arresters for AC Application*. In: IEEE Transactions on Power Delivery Band 1 (2), Seiten 67-74, 1986. issn: 0885-8977. doi: 10.1109\TPWRD.1986.4307935.
- [Chr2001] K. L. Chrzan. *Degradation of Metal Oxide Varistors Caused by Electrical Stresses*. In: 2001, Polen, 11. international Conference on Electromagnetic Disturbances 2001.
- [Cig2013] Cigré TB 544, Arbeitsgruppe A3.17. *MO Surge Arresters*, 2013

- [Cig2017] Cigré TB 696, Arbeitsgruppe A3.25. *MO Surge Arresters - Metal Oxide Resistors and Surge Arresters for Emerging System Conditions*, 2017
- [Cla1999] D. Clarke. *Varistor Ceramics*. In: Journal of the American Ceramic Society, Band 82 (3), Seiten 485-502, 1999. issn: 00027820. doi: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01793.x.
- [Den1998] K. Dengler. *Impulsalterung von Metalloxidableitern und ihre Überwachung im Betrieb*. Dissertation. Universität Stuttgart, 1998.
- [DGC2011] L. Donzel, F. Greuter und T. Christen. *Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications*. In: IEEE Electrical Insulation Magazine Band 27 (2), Seiten 18-29, 2011. issn: 0883-7554. doi: 10.1109/MEI. 2011.5739419.
- [DIN1319-3] DIN, Herausgeber. *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit*. Beuth, 1996.
- [Eda1978] K. Eda. *Conduction mechanism of non-Ohmic zinc oxide ceramics*. In: Journal of Applied Physics, Band 49, 1978.
- [Eda1978b] K. Eda. *Conduction mechanism of non-Ohmic zinc oxide ceramics*. In: Journal of Applied Physics, Band 49 (5), Seiten 2964-2972, 1978. doi: 10.1063/1. 325139.
- [Eda1979] K. Eda. *Transient conduction phenomena in non-Ohmic zinc oxide ceramics*. In: Journal of Applied Physics, Band 50 (6), Seite 4436-4442, 1979. doi: <https://doi.org/10.1063/1.326436>
- [Eda1984] K. Eda. *Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents*. In: Journal of Applied Physics, Band 56 (10), Seiten 2948-2955, 1984. doi: 10.1063/1.333836.
- [Eda1988] K. Eda. *Progress in Fabrication Technology of Zinc Oxide Varistors*. In: Advances in Varistor Technology. Tagungsbericht der 2. internationalen Varistorkonferenz, Seiten 10-21, 1988
- [Eda1989] K. Eda. *Zinc oxide varistors*. In: IEEE Electrical Insulation Magazine Band 5 (6), Seiten 28-30, 1989. issn: 0883-7554. doi: 10.1109/57.44606.
- [EEG2017] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien* (Erneuerbare Energien-Gesetz, EEG). Version 2017
- [EHL1976] A. Eckström , H. Härtel, H. P. Lips, W. Schultz. *Design and testing of an HVDC circuit-breaker*. Cigré Konferenz Paris, Frankreich, Paper 13-06.
- [EIM1980] K. Eda, A. Iga und M. Matsuoka. *Degradation mechanism of non-Ohmic zinc oxide ceramics*. In: Journal of the American Ceramic Society Band 51 (5), Seite 2678, 1980. issn: 00027820. doi: 10.1063/1.327927.

- [Fra2011] C. M. Franck. *HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs*. In: IEEE Transactions on Power Delivery Band 26 (2), Seiten 998-1007, 2011. issn: 0885-8977. doi: 10.1109\TPWRD.2010.2095889.
- [Gau2001] L. Gauckler. *Ingenieurkeramik III. Funktionskeramiken*, 2001, ETH Zürich.
- [GB1990] F. Greuter und G. Blatter. *Electrical properties of grain boundaries in polycrystalline compound semiconductors*. In: Semiconductor Science and Technology Band 5 (2), Seiten 111-137, 1990. issn: 0268-1242. doi: 10.1088\0268-1242\5\2\001.
- [GHG2017] M. Giessel, V. W. Hinrichsen, R. Göhler und Y. Späc-Leigsnering. *Electro-Thermal Simulations of High Voltage Metal-Oxide Surge Arresters with and without installed Grading Rings with regard to Thermal Stability*. In: Cigré Konferenz Winnipeg, Kanada, 2017.
- [Gre1995] F. Greuter. *Electrically active interfaces in ZnO varistors*. In: Solid State Ionics Band 75, Seiten 67-78, 1995.
- [GST2015] O. G. Gromov, Yu. A. Savelev, E. L. Tikhomirova, A. N. Danilin, V. V. Kolobov, E. P. Lokshin und V. T. Kalinnikov. *Preparation of high-voltage ZnO varistor ceramics*. In: Inorganic Materials Band 51 (5), Seiten 516-519, 2015. issn: 0020-1685. doi: 10.1134\S0020168515050040.
- [Gup1990] T. K. Gupta. *Application of Zinc Oxide Varistors*. In: Journal of the American Ceramic Society Band 73 (7), Seiten 1817-1840, 1990. issn: 00027820. doi: 10.1111\j.1151-2916.1990.tb05232.x.
- [HBH2019] P. Hock, N. Belda und V. Hinrichsen. *Investigations on Metal-Oxide Surge Arresters for HVDC Circuit Breaker Applications*. In: INMR, Tucson Arizona, USA, 2019
- [HCH2016] J. He, C. Cheng und J. Hu. *Electrical degradation of double- Schottky barrier in ZnO varistors*. In: AIP Advances Band 6 (3), 2016. doi: 10.1063\1.4944485.
- [Hei2017] T. Heinz. *Gleichstromschalten in der Mittel- und Hochspannungstechnik unter Einsatz von Vakuumschaltröhren*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2017.
- [Hei17a] T. Heinz. *Gleichstrom-Schalteneinrichtung*, DE Patent App. DE 10 2015, 216 769 A1. März 2017.
- [Hei17b] T. Heinz. *Gleichstrom-Schalteneinrichtung und deren Verwendung*, DE Patent App. DE 10 2015 217 578 A1. März 2017.

- [HHJ2015] A. Hassanpoor, J. Hafner und B. Jacobson. *Technical Assessment of Load Commutation Switch in Hybrid HVDC Breaker*. In: IEEE Transactions on Power Electronics Band 30 (10), Seiten 5393-5400, 2015. issn: 0885-8993. doi: 10.1109/TPEL.2014.2372815.
- [Hin2011] V. Hinrichsen. *Metalloxid-Ableiter in Hochspannungsnetzen* Herausgegeben von SIEMENS AG, Dritte Auflage, 2011.
- [IEC60060-1] IEC 60060-1, Herausgeber. *High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*, Edition 3, 29. Sep. 2010.
- [IEC60060-2] IEC 60060-2, Herausgeber. *High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems* Edition 3, 29. Nov. 2010.
- [IEC60099-4] IEC 60099-4, Herausgeber. *Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems* Edition 3, 30. Apr. 2014.
- [IEC60099-5] IEC 60099-5, Herausgeber. *Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations* Edition 3, 19. Jan. 2018.
- [IEC60099-9] IEC 60099-9, Herausgeber. *Surge arresters - Part 9: Metal-oxide surge arresters without gaps for HVDC converter stations*. Edition 1, 26. Juni 2014.
- [IEC60143-2] IEC60143-2, Herausgeber. *Series Capacitors for Power Systems* "Part 2: Protective Equipment for Series Capacitor Banks". Edition 2, 1. Dez. 2012.
- [IEC62271-100] IEC 62271-100, Herausgeber. *High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers*. Edition 2.2, 15. Juni 2017.
- [JN1983] T. Jinzenji, H. Nishikawa, T. Sakuma, K. Yokokura, S. Kobayashi, Y. Ishigame und T. Hosokawa. *Development of Zinc Oxide Ceramic Energy Absorbers for DC Thyristor Circuit Breakers*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Band PER-3, Seiten 1429-1436, 1983. issn: 0272-1724 . doi: 10.1109/MPER.1983.5519186.
- [Kle2004] T. Klein. *Einflüsse auf das Energieaufnahmevermögen von Metalloxidableitern*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2004.
- [KLN1999] K. Kannus, K. Lahti und K. Nousiainen. *Effects of impulse current stresses on the durability and protection performance of metal oxide surge arresters*. In: 11th International Symposium on High-Voltage Engineering, London, UK, 1999 (ISH 99). Beitrag 377. isbn: 0 85296 719 5. doi: 10.1049/cp:19990671.

- [KM1978] M. Kobayashi, M. Mizuno, T. Aizawa, M. Hayashi und K. Mitani. *Development of Zinc-Oxide Non-Linear Resistors and Their Applications to Gapless Surge Arresters*. In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Band PAS-97 (4), Seiten 1149-1158, 1978. issn: 0018-9510. doi: 10.1109\TPAS.1978.354595.
- [KS2012] P. Kurzweil und P. Scheipers. *Chemie. Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. ger. 9., erw. Aufl. Naturwissenschaftliche Grundlagen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag /Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012. isbn: 3834882801. doi: 10.1007\978-3-8348-8280-6. url: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8280-6>.
- [LH1995] E. Lakervi und E. J. Holmes. *Electricity distribution network design*, 2. Ausgabe, I E E power series,. 1996. isbn: 0863413080.
- [LP1975] L. M. Levinson und H. R. Philipp. *The physics of metal oxide varistors*. In: Journal of the American Ceramic Society Band 46 (3), Seiten 1332-1341, 1975. issn: 00027820. doi: 10.1063\1.321701.
- [LP1976] L. M. Levinson und H. R. Philipp. *High-frequency and high-current studies of metal oxide varistors*. In: Journal of Applied Physics Band 47 (7), 1976, Seiten 3116-3121. doi: 10.1063\1.323059.
- [Mat1971] M. Matsuoka. *Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics*. In: Japanese Journal of Applied Physics Band 10 (6), Seiten 736â€“746, 1971. issn: 0021-4922. doi: 10.1143\JJAP.10.736.
- [MM1990] F. A. Modine, R. W. Major, S. I. Choi, L. B. Bergman und M. N. Silver. *Polarization currents in varistors*. In: Journal of the American Ceramic Society Band 68 (1), Seiten 339-346, 1990. issn: 00027820. doi: 10 . 1063 \ 1 . 347138.
- [Mue2017] T. Mühl. *Messabweichung und Messunsicherheit*. In: Elektrische Messtechnik. Herausgegeben von Thomas Mühl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, Seiten 19-37, 2017. isbn: 978-3-658-15719-7. doi: 10.1007\978-3-658-15720-3_2.
- [MW1987] F. A. Modine und R. B. Wheeler. *Fast pulse response of zincâ€“oxide varistors*. In: Journal of Applied Physics Band 61 (8), Seiten 3093-3098, 1987. doi: 10.1063\1.337809.
- [MYU2016] T. W. May, Y. M. Yeap und A. Ukil. *Comparative evaluation of power loss in HVAC and HVDC transmission systems*. In: 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). TENCON 2016 - (Singapore). 2016. isbn: 978-1-5090-2597-8. doi: 10.1109\TENCON.2016.7848080.

- [PL1976] H. R. Philipp und L. M. Levinson. *Long-time polarization currents in metal-oxide varistors*. In: Journal of Applied Physics Band 47 (7), Seiten 3177-3181, 1976. doi: 10.1063\1.323113.
- [RBD2012] A. Recnik, S. Bernik und N. Daneu. *Microstructural engineering of ZnO-based varistor ceramics*. In: Journal of Materials Science Band 47 (4), Seiten 1655-1668, 2012. issn: 0022-2461. doi: 10.1007\s10853-011- 5937-2.
- [Rei2008] M. Reinhard. *Experimentelle Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von Metalloxidwiderständen eingesetzt in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung eines komplexen Fehlerkriteriums*, Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [SBG1987] F. Stucki, P. Brüesch, F. Greuter. *Electron Spectroscopic Studies of Electrically Active Grain Boundaries in ZnO*. In: Surface Science, Band 189-190, Seiten 294-299, 1987.
- [Sch1994] H. Schaumburg. *Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik*, 5. Auflage. Stuttgart, Vierweg+Teubner, 1994. isbn: 978-3519061274.
- [SG1990] F. Stucki und F. Greuter. *Key role of oxygen at zinc oxide varistor grain boundaries*. In: Journal of the American Ceramic Society Band 57 (5), Seiten 446-448, 1990. issn: 00027820. doi: 10.1063\1.103661.
- [SIE2014] SIEMENS AG. *5000A DC Siemens commutation breaker successfully tested in China*. 2014. http://www.ptd.siemens.de/141216_Newsletter_5000A_MRTB.pdf, Stand 01.10.2019
- [SLF2016] T. Schultz, V. Lenz, C.M. Franck. *Circuit Breakers for Fault Current Interruption in HVDC Grids*. In: ETG Symposium, VDE High Voltage Technology 2016, Berlin, Deutschland, 2016.
- [SP1979] C. G. Shirley und W. M. Paulson. *The pulse-degradation characteristic of ZnO varistors*. In: Journal of Applied Physics Band 50 (9), Seiten 5782-5789, 1979. doi: 10.1063\1.326719.
- [TBH2015] M. N. Tuzek, M. Bröker, V. Hinrichsen und R. Göhler. *Effects of Continuous Operating Voltage Stress and AC Energy Injection on Current Sharing Among Parallel-Connected Metal-Oxide Resistor Columns in Arrester Banks*. In: IEEE Transactions on Power Delivery Band 30 (3), Seiten 1331-1337, 2015. issn: 0885-8977. doi: 10.1109\TPWRD.2014. 2365045.
- [Tuc2014] M. Tuzek. *Experimentelle Untersuchung zur Mehrfachimpulsbelastbarkeit an Metalloxidvaristoren für Anwendungen in der elektrischen Energietechnik*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2014.

- [UN1998] United Nations. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework convention on Climate Change*. Herausgegeben von BMU. Version 1998. 1998.
- [USP2012] D. Q. Tan, I. P. Chapman, A. Younsi. United States Patent 8,217,751 *Electronic device and method*, 2012.
- [Vic1986] A. Vicaud. A. C. *Voltage Ageing of Zinc - Oxide Ceramics*. In: IEEE Transactions on Power Delivery Band 1 (2), Seiten 49–58, 1986. issn: 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.1986.4307933.
- [VNJ1991] J. Vipin, G. Nagabhushana, B. Jayaram. *Investigation on Electro-Thermal Ageing of Metal Oxide Surge Arrester Elements: A Realistic Laboratory Simulations*. In: 3rd Int.Conf. on Properties and Application of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, July 1991.
- [Wal2013] M. Walter. *Switching arcs in passive resonance HVDC circuit breakers*, Dissertation, ETH Zürich, 2013.
- [WB1976] J. Wong und F. P. Bundy. *Pressure effects on metal oxide varistors*. In: Journal of the American Ceramic Society Band 29 (1), Seiten 49-50, 1976. issn: 00027820. doi: 10.1063/1.88869.
- [WM2015] Y. Wang und R. Marquardt. *Performance of a new fast switching DCBreaker for meshed HVDC-Grids*. In: 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2015 ECCE-Europe), Geneva, Schweiz, 2015. Seiten 1-9. isbn: 978-9-0758-1522-1. doi: 10.1109/EPE.2015.7309255.
- [ZFZ1991] M. Zhang, L. Fuyi und L. Ziyu. *Studies on degradation mechanism of ZnO varistor under impulse stress by thermally stimulated current*. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, 1991, Seiten 513-516. isbn: 0-87942-568-7. doi: 10.1109/ICPADM.1991.172110.

Eigene Publikationen

- [BH2019] M. Bröker und V. W. Hinrichsen. *Testing Metalâ€Oxide Varistors for HVDC Breaker Application*. In: IEEE Transactions on Power Delivery Band 34 (1), Seiten 346-352, 2019. issn: 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2018. 2877464.

- [TBH2015] M. N. Tuzek, M. Bröker, V. W. Hinrichsen und R. Göhler. *Effects of Continuous Operating Voltage Stress and AC Energy Injection on Current Sharing Among Parallel-Connected Metalâ€‘Oxide Resistor Columns in Arrester Banks*. In: IEEE Transactions on Power Delivery Band 30 (3), Seiten 1331-1337, 2015. issn: 0885-8977. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2365045.

Betreute studentische Arbeiten

- [Kli2013] M. Klich. *Literaturrecherche zu MO-Varistoren in Leistungselektronischen Anlagen*. In: Abschlussarbeit Nr. 1900, TU Darmstadt, 2013.
- [Luk2012] A. Lukaschik. *Aufbau eines Alterungsversuchsstandes zur zyklischen Impulsbelastung von Metalloxid-Varistoren*. In: Abschlussarbeit Nr. 1880, TU Darmstadt, 2012.
- [Pab2013] F. Pabst. *Durchführen von Versuchsreihen an einem Versuchsstand mit Umrichter gesteuerten Motoren zur Dauerbelastung von MO-Varistoren*. In: Abschlussarbeit 1917, TU Darmstadt, 2013.
- [Pes2013] T. Pessoa. *Construction of an inverter-fed motor-generator set to test metal-oxide varistors*. In: Abschlussarbeit Nr. 1916, TU Darmstadt, 2013.
- [Sch2015] D. C. Schimmel. *Aufbau eines Versuchsstandes zur Messung thermisch stimulierter Ströme*. In: Abschlussarbeit Nr. 1947, TU Darmstadt, 2015.

Lebenslauf

Maike Bröker
geborene Ufer
in Lindlar

Seit 09/2018	Elternzeit
10/2011 bis 09/2018	Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Hochspannungstechnik der TU Darmstadt
09/2011	Abschluss durch Masterthesis mit dem Thema “Untersuchung der Kennlinienalterung von MO-Varistoren durch Wechselstromenergieeinträge“
10/2008 bis 10/2011	Master Studium Elektrotechnik an der TU Darmstadt
04/2008	Abschluss durch Bachelorthesis mit dem Thema “Untersuchung zu Hörmodellen im Hinblick auf ihr Verhalten bei tieffrequenter Anregung“
10/2004 bis 10/2008	Bachelor Studium Elektrotechnik an der Bergischen Universität Wuppertal
06/2004	Allgemeine Hochschulreife am Gymnasium Grotenbach Gummersbach

Darmstadt, im Februar 2019

Erklärung laut Promotionsordnung § 9 PromO

§ 8 Abs. 1 lit.c PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

§ 8 Abs. 1 lit.d PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

§ 9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

§ 9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, 22.02.2019

Maike Bröker